

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Tanja Protić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc.dr.sc. Dragutin Lisjak

Student:

Tanja Protić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Dragutinu Lisjaku na podršci i brojnim stručnim savjetima tijekom izrade rada.

Posebno zahvaljujem Mariji Marković na pomoći i savjetima tijekom izrade rada. Zahvaljujem i svojoj obitelji na pomoći, podršci te izuzetnoj strpljivosti prilikom studija i izrade ovog završnog rada.

Tanja Protić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **TANJA PROTIĆ**

Mat. br.:0035172968

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ODRŽAVANJE NA TEMELJU ANALIZE VIBRACIJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **MAINTENANCE BASED ON VIBRATION ANALYSIS**

Opis zadatka: 1. Opisati vibracijsku analizu kao preventivnu metodu za održavanje rotacijske opreme,
2. Dati pregled i opisati opremu za mjerenje vibracija,
3. Dati pregled i detaljno opisati aplikativnu primjenu,
4. Zaključak.

Zadatak zadan:
16. studenog 2012.


Rok predaje rada:
1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Dragutin Lisjak

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. UVOD U PREVENTIVNO ODRŽAVANJE	2
2.1. Utjecaj održavanja.....	2
2.2. Upravljanje održavanjem	3
2.3. Korektivno održavanje	3
2.4. Preventivno održavanje.....	4
2.4.1. Preventivno – plansko održavanje	5
2.4.2. Preventivno – održavanje po stanju (prediktivno)	7
3. ANALIZA I MJERENJE VIBRACIJA.....	10
3.1. Osnove vibracija	10
3.2. Mjerenje vibracija	12
3.2.1. Ukupna vrijednost vibracija.....	14
3.2.2. Računanje frekvencijskog spektra	14
3.2.3. Daljnje objašnjenje ispravnog korištenja spektar analize	16
3.3. Veza između frekvencije i vremena.....	18
3.3.1. Dominantna pojedinačna frekvencija	18
3.3.2. Udarno opterećenje	19
3.3.3. Trapezni val	19
3.3.4. Modulacija	20
3.4. Rezonancija dinamičkih sustava	21
3.4.1. Rezonancija.....	21
3.4.2. Upravljanje rezonancijom	23
3.5. Faze	24
3.5.1. Fazni pomak na rotirajućim vratilima.....	25
4. PRIMJENA MJERENJA VIBRACIJA ZA PRAĆENJE STANJA.....	28
4.1. Provjera stanja.....	28
4.2. Održavanje po stanju.....	29
4.3. Mjerenje vibracija	29
4.4. Praćenje stanja vibracija sustava.....	30
4.4.1. Sonde.....	30
4.4.2. Data kolektor.....	32
4.4.3. Softver.....	32
4.5. Postavljanje sustava	32
4.6. Prikaz podataka	34

4.6.1.	Dijagram nagiba.....	34
4.6.2.	Dijagram spektra.....	35
4.6.3.	„Vodopad“ dijagram.....	37
4.7.	Efektivno korištenje praćenja stanja vibracija.....	39
5.	DIJAGNOSTIKA KVARA STROJA ANALIZOM VIBRACIJA.....	40
5.1.	Glavni uzroci kvarova na strojevima.....	40
5.2.	Bitne primjene analize vremenske domene.....	41
5.3.	Smjernice za izbor domene.....	42
5.4.	Upute za postavljanje frekventne domene.....	43
5.5.	Četiri glavna razloga nastajanja kvara.....	43
5.5.1.	Neravnoteža.....	43
5.5.2.	Asimetričnost.....	44
5.5.3.	Zračnost.....	45
5.6.	Napredne tehnike analize.....	45
5.6.1.	Oblik otklona tijekom rada (ODS).....	45
5.6.2.	Višekanalno prikupljanje podataka.....	48
5.6.3.	Strukturna mjerenja.....	49
5.7.	Posebni slučajevi.....	49
5.7.1.	Reduktori.....	49
5.7.2.	Centrifugalni ventilatori.....	51
5.7.2.1.	Iznenadna promjena protoka.....	51
5.7.2.2.	Pojava rezonancije.....	51
5.7.2.3.	Nagnuti ležaj.....	51
5.7.2.4.	Struganje.....	51
5.7.2.5.	Neravnomjerno aerodinamičko opterećenje.....	51
5.7.2.6.	Oštre prolazne vibracije.....	52
5.7.3.	Dijagnostika klipnih strojeva.....	52
5.7.4.	Turbo strojevi.....	52
5.8.	Razumijevanje oblika valova u vremenskoj domeni.....	53
5.8.1.	Sinusoidalni valovi.....	53
5.8.2.	Važnost rezolucije i vremenskog mjerila.....	55
5.8.3.	Utjecaji fazne promjene na zbrajanje sinusoidalnih valova.....	57
5.8.4.	Simetrija amplitudnog mjerila i skraćenje.....	58
5.8.5.	Simetrija vremenskog mjerila.....	59
5.8.6.	Sinkroni i nesinkroni valni oblici.....	60
6.	IZOLACIJA VIBRACIJA.....	62
6.1.	Primjena.....	62
6.2.	Pomak i vlastita frekvencija.....	62
6.3.	Praktične primjene odabira i projektiranja izolacije od vibracija.....	63
6.3.1.	Smanjenje prijenosa sila sa stroja na njegovu nosivu konstrukciju.....	63
6.3.2.	Prijenos sila sa strukture na opremu.....	65
6.4.	Dinamički prigušivač.....	65
6.4.1.	Teorija izolacije.....	66
6.5.	Primjer izračuna izolacija vibracija.....	67
7.	VIBRACIJSKA ANALIZA KAO PREVENTIVNA METODA ZA ODRŽAVANJE ROTACIJSKE OPREME.....	69

7.1. FFT vibracijski analizatori	69
7.2. Centriranje komparatorima	72
8. OPREMA ZA MJERENJE VIBRACIJA	74
8.1. Mobilni uređaji.....	74
8.1.1. VibXpert, VibXpert II.....	74
8.1.1.1. Vibcode	80
8.1.2. Vibscanner	83
8.1.3. Vibrotip	84
8.2. Uređaji za permanentni nadzor	85
8.2.1. Vibroweb.....	85
8.2.2. Vibnode.....	87
8.2.3. Vibronet	90
8.2.4. Vibrex	94
8.3. Uređaji za balansiranje rotacijskih tijela.....	97
8.3.1. Portable Balancing Set PBS 380.....	97
9. APLIKATIVNA PRIMJENA.....	101
9.1. VIBREX - primjeri mjerne aplikacije u praksi	101
9.2. PORTABLE BALANCING SET PBS 380 - primjeri mjerne aplikacije u praksi...	103
10. ZAKLJUČAK.....	110
LITERATURA.....	111
PRILOZI.....	1

POPIS SLIKA

Slika 1. Krivulja kade [2]	6
Slika 2. Sustav masa-opruga-prigušivač [15]	11
Slika 3. Neovisni prednji ovjes (Volvo) [16]	11
Slika 4. Veza između pomaka, brzine i ubrzanja za sinusnu vibraciju [15]	12
Slika 5. Dijagram procesa mjerenja i analize vibracija [15]	13
Slika 6. Primjer motora koji proizvodi tri različite vrste vibracija [15]	15
Slika 7. Sinusoidalna frekvencija [15]	18
Slika 8. Savršena udarna frekvencija (gore) i ponavljajuće frekvencije (dolje) [15]	19
Slika 9. Trapezni val u frekvencijskoj i vremenskoj domeni [15]	20
Slika 10. Modulacija [15]	20
Slika 11. Ovisnost frekvencije o sili [15]	22
Slika 12. Klasična krivulja rezonancije sustava [15]	23
Slika 13. Principi mjerenja faze [15]	25
Slika 14. Fazni pomak na rotirajućoj osovini ili vratilu [15]	26
Slika 15. Problem neizvjesnosti pri primjećivanju promjene [17]	31
Slika 16. Dijagram nagiba [17]	34
Slika 17. Nagib parametra stanja ležaja (demodulirano ubrzanje) u vremenu [17]	35
Slika 18. Dijagram spektra rashladnog vijčanog kompresora s rasponom frekvencija 0 - 500 Hz i 400 linija rezolucije [17]	36
Slika 19. Uvećani spektar rashladnog vijčanog kompresora [17]	36
Slika 20. Signali razvoja oštećenja na ležaju u vijčanom rashladnom kompresoru [17]	37
Slika 21. Razvoj zračnosti potpore ležaja vertikalnog separatora kao rezultat prekomjerne neuravnoteženosti (nakon balansiranja zračnost ostaje) [17]	37
Slika 22. Zakrenuti „Vodopad“ dijagram kako bi se vidjela tendencija povećanja ozbiljnosti specifične frekvencije indicirajući pogoršanje debalansa kod vertikalnog separatora [17]	38
Slika 23. Prikaz promjene stanja cilindra za printanje na ofsetnom stroju za tisak [17]	38
Slika 24. Tipični troosni spektar neuravnoteženog stroja [18]	44
Slika 25. Odzivi ležaja stroja [18]	44
Slika 26. Spektar zračnosti [18]	45
Slika 27. Generirani model konačnih elemenata generatora i izračunati odzivi brzine u tri translacijska smjera vezano uz brzinu vrtnje rotora (RPM) [21]	47
Slika 28. Izmjereno vertikalno savijanje ODS-a okvira generatora na 35 Hz (oko 50 mjernih točaka, sve mjereno u tri translacijska smjera) [21]	47
Slika 29. Korištenje ODS analize - izvor problema se može suziti na globalno kotrljajuće kretanje [21]	48
Slika 30. Čisti sinusni val [18]	53
Slika 31. Valni oblik nastao dodavanjem drugog harmonika ($2 \times \text{min-1}$) [18]	54
Slika 32. Valni oblik nastao dodavanjem četvrtog harmonika ($4 \times \text{min-1}$) [18]	54
Slika 33. Val nastao dodavanjem komponente visoke frekvencije [18]	55
Slika 34. Val nastao dodavanjem vrlo visoke frekvencije - tipični valni oblik [18]	55
Slika 35. Valni oblik vremenskog raspona 1,2 s [18]	56
Slika 36. Uvećani valni oblik sa slike 35. [18]	56
Slika 37. Prikaz valnog oblika pri nedovoljnoj rezoluciji [18]	57

Slika 38. Valni oblik s faznom razlikom od 0° [18].....	57
Slika 39. Pomak za 90° [18].....	58
Slika 40. Pomak za 180° [18].....	58
Slika 41. Signal akcelerometra nastao asimetričnošću kućišta ležaja [18]	59
Slika 42. Signal stvarne asimetričnosti stroja [18].....	59
Slika 43. Serija ponavljajućih impulsa [18]	60
Slika 44. Sinkroni valni oblik [18]	60
Slika 45. Valni oblik dvopolnog motora [18]	61
Slika 46. Pomicanje komponenti više frekvencije [18].....	61
Slika 47. Inercijski blok [19].....	64
Slika 48. Krivulje apsolutne prenosivosti kao funkcija omjera frekvencija f/f_0 za razne omjere prigušenja [19].....	66
Slika 49. FFT spektar vibracija prije centriranja [14]	70
Slika 50. FFT spektar vibracija nakon centriranja [14].....	71
Slika 51. Vrste necentričnosti [14]	72
Slika 52. Greške u postupku centriranja [14]	73
Slika 53. VibXpert II [6]	75
Slika 54. Organizacija Vibcode mjernog sustava [6]	81
Slika 55. Primjer mjernih točaka i mjernih veličina [6]	82
Slika 56. Nadzor u širokom frekvencijskom pojasu [10].....	89
Slika 57. Nadzor u selektivnim frekvencijskim pojasima [10]	90
Slika 58. Princip mjerenja i obrade podataka sustavom Vibronet [11].....	91
Slika 59. Vibronet sustav u eksploataciji [11].....	92
Slika 60. Vibrex mjerni sustav [12]	95
Slika 61. Vibrex mjerno osjetilo [12].....	95
Slika 62. Priključeni VIB 5.762 I Vibrex mjerni sustav [12].....	101
Slika 63. Priključeni VIB 5.764 I Vibrex mjerni sustav [12].....	102
Slika 64. Priključeni VIB 5.765 I Vibrex mjerni sustav [12].....	103
Slika 65. Balansiranje s BPS 380 - metoda "na licu mjesta" [13].....	104
Slika 66. Balansiranje s BPS 380 – statička balansirka [13].....	106

POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjena različitih domena ovisno kvarovima [18]	42
Tablica 2. Karakteristike Vibronet sustava [11].....	93
Tablica 3. Izmjereni podaci za početno stanje [13].....	105
Tablica 4. Izmjereni podaci uz test masu [13]	105
Tablica 5. Prva provjera stanja izbalansiranosti [13]	105
Tablica 6. Druga provjera stanja izbalansiranosti [13]	106
Tablica 7. Treća provjera stanja izbalansiranosti [13]	106
Tablica 8. Balansiranje u dvije ravnine [13]	108
Tablica 9. Podaci za korekciju 1 [13].....	108
Tablica 10. Korekcija – provjera 1 [13]	108
Tablica 11. Podaci za korekciju 2 [13].....	109
Tablica 12. Korekcija – provjera 2 [13]	109
Tablica 13. Podaci za korekciju 3 [13].....	109

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
m	kg, g	Masa
c	kg/s	Konstanta prigušivača
k	kN/m	Konstanta opruge
\ddot{x}	m/s^2	Ubrzanje
\dot{x}	m/s, mm/s, RMS	Brzina
x	μm , mm	Pomak, progib
n	min^{-1} , RPM	Broj okretaja
f_n	Hz	Vlastita frekvencija sustava
F	N	Sila

SAŽETAK

Održavanje je kombinacija svih tehničkih i odgovarajućih administrativnih aktivnosti predviđenih za očuvanje nekog sredstva rada - radnog sustava ili dovođenje istog u stanje u kojem on može obavljati predviđenu funkciju.¹

Cilj rada je postići razumjevanje osnovnih principa mjerenja i analize vibracija koji bi trebali biti temelj za razvoj sposobosti dijagnosticiranja kvara. Glavni fokus je primjena mjerenja vibracija u praćenju stanja stroja te razumjevanje principa i aplikativne primjene izolacije vibracija. Također, razmatraju se i dijagnostički procesi korišteni za analizu vibracija kako bi se pronašli uzroci prekomjernih vibracija, a time i potencijalnih razloga kvara stroja.

U današnjem svijetu ogroman je napredak tehnologije i znanosti, a tema koja je u ovom tekstu obrađena samo je sitan dio znanja koje danas imamo na raspolaganju. Kada bi svijet trebalo zamisliti bez računala, u takvom svijetu poduzećima bi bilo jako teško opstati na tržištu i proširivati tržište. Veća kvaliteta proizvoda, pouzdanost i dostupnost postrojenja, optimizacija troškova i odabir ispravne metode održavanja predstavlja glavni problem.

Održavanje po stanju analizom vibracija predstavlja alat koji se u industriji primjenjuje već duže vremena. Njegova primjena omogućava tri razine analize: monitoring, dijagnoza i praćenje stanja oštećenja opreme. Snimljeni signali vibracija su rezultat miješanja vibracija iz različitih izvora odnosno različitih elemenata stroja, zbog čega je teško interpretirati stupanj oštećenja određenog elementa. Izdvajanjem frekvencijskih signala pojedinih elemenata postiže se ne samo lokalizacija kvarova na elementima nego i praćenje procjene oštećenja na svakom elementu.

Ključne riječi: Održavanje, analiza vibracija.

¹EOQC (European Organization for Quality Control)

SUMMARY

Maintenance is the combination of all technical, administrative and managerial actions during the life cycle of an item intended to retain it in, or restore it to, a state in which it can perform the required function.

The goal of this labor is to learn basic principles of vibration measurement and analysis in order to lay the foundation for capable fault diagnosis. The principal focus is the application of vibration measurement to condition monitoring, and understanding the principles and practical application of vibration isolation. Also, considering the diagnostic processes used to analyse vibration data to find the causes for excessive vibration and therefore the reasons for potential failure in a machine.

Presently the world has enormous advancement in science and technology, and the topic considered here is just a drop out of an ocean of knowledge. Thinking of life without a computer, it is very difficult for any firm or organization to survive or expand in the market. Higher product quality, better reliability, better availability of plants, optimization of cost and choosing right maintenance procedure is the chief concern.

Condition based maintenance using vibration analysis turns out to be a brilliant tool for some decades for the industry. Its use is intended to provide three levels of analysis: monitoring, diagnosis and monitoring of the state of equipment damage. Practically, the recorded vibration signals are the result of a different sources mixture for components of machine, which makes it difficult to interpret the state of damage of a particular component. Separating the components will permit not only the localization of the faults on components, but also the follow up of damage evaluation of each one.

Key words: Maintenance, vibration analysis.

1. UVOD

Od davnina ljudi su imali potrebu analizirati svoju okolinu. Koristeći se nekom vrstom analize vlastitih iskustava 'praljudi' su vrlo vjerojatno točno znali gdje trebaju loviti, gdje je dobro nastaniti se, a gdje ne. Danas trgovački lanci analiziraju svoje kupce, analizira se uspješnost, proizvodi, ljudi, krvne slike, natalitet, mortalitet, ukratko analizira se apsolutno sve. Postavlja se pitanje: *Zašto je analiza toliko važna?* Sve oko nas, strojevi, organizmi pa čak i žarulje stvaraju podatke. Podaci koji nastaju mogu nam dati različite informacije. Izrazito su bitni jer pomažu pri donošenju odluka i procjenjivanju, no što ih je više to je teže snaći se u njima. Pojavom mikroprocesora napredovao je proces prikupljanja i analize podataka [15]. Ispravnim sustaviziranjem podataka dobiva se globalna slika problema te se tako lakše razlučuje bitno od nebitnoga. Na temelju toga se donosi ispravna odluka, a povezivanjem i kombiniranjem različitih podataka može se doći do novih spoznaja. Tako i sustavi koji su bili skriveni postaju savršeno jasni.

Sve oko nas titra, iako mi to možda ne doživljavamo. Međutim, kada se se spustimo na razinu atoma zapravo nikada ništa ne miruje. U ovom radu razmatrat će se upravo oni podaci koji se stvaraju titranjem odnosno vibriranjem opreme. Dakle, glavna tema je mehanička oprema koja titra za vrijeme rotiranja.

Najjednostavniji primjer su zrakoplovi. Činjenica je da je vožnja zrakoplovom najsigurnija, međutim postavlja se pitanje zašto je tomu tako? Odgovor je – održavanje.

Razlog je očit. Kada je zrakoplov jednom u zraku, i ako dođe do kvara, on ne može poput automobila stati malo sa strane i riješiti problem. Ukoliko dođe do kvara posljedice su katastrofalne. Naravno, održavanje nije jedini način osiguravanja, zrakoplovi imaju duple one dijelove koji su od izuzetne važnosti.

Zrakoplovi se održavaju ovisno o broju sati koje provode u zraku (A-check, B-check, C-check, IL-check, D-check). Oni su jako skupa vozila i to je jedan od razloga zašto je održavanje toliko bitno jer su u pogonu i do 20 godina.

Upravno je održavanje na temelju analiza vibracija izrazito bitno iz razloga što se može primijeniti na različita područja.

2. UVOD U PREVENTIVNO ODRŽAVANJE

Iako je svijet u kojem danas živimo izrazito razvijen to ne znači da se stvari koje ljudi koriste neće kvariti. Nije ni bitno što će se kvariti sve dok znamo kada, kako i gdje će se nešto pokvariti. Održavanje nema samo cilj popravljati ili zamijeniti pokvareno već razumjeti pojedine elemente sustava i način na koji se ti elementi koriste. Dva stroja mogu izgledati jednako, ali to ne mora značiti da se trebaju održavati na jednak način. Potrebno je razmotriti okolinu u kojoj se koriste i način na koji se koriste. Pa tako jedan stroj može biti korišten neprekidno, dok drugi stroj možda radi u okolini u kojoj su izrazito visoke temperature.

Prema EFNMS²-u održavanje je funkcija poduzeća kojoj su povjerene stalna kontrola nad postrojenjima i obavljanje određenih popravaka i revizija, čime se omogućava stalna funkcionalna sposobnost i očuvanje proizvodnih i pomoćnih postrojenja te ostale opreme [2].

2.1. Utjecaj održavanja

Troškovi održavanja čine velik dio ukupnih troškova u proizvodnim pogonima. Ovisno o industriji troškovi održavanja mogu činiti 15 do 60 posto troškova proizvodnje. Tako npr., u prehrambenoj industriji prosječni troškovi održavanja čine oko 15 posto ukupnih troškova proizvodnje, dok prosječni troškovi održavanja u industrijama koje prerađuju željezo, čelik, celulozu i papir čine oko 60 posto ukupnih troškova proizvodnje [1].

Ovi postoci nas mogu vrlo brzo dovesti u zabludu. Većina američkih postrojenja pod troškove održavanja ubraja i troškove koji ne spadaju u troškove održavanja već u neke druge troškove. Tako poduzeća uvode promjene u postojeća postrojenja kako bi se prilagodila tržišnim zahtjevima, kao npr. novi proizvodi. Takvi troškovi zapravo ne spadaju u troškove održavanja, uglavnom stvarni troškovi održavanja su značajni i predstavljaju kratkoročni napredak koji može izravno utjecati na profitabilnost poduzeća.

Istraživanja provedena 2002. godine od strane *U.S. Department of Energy* pokazala su da jedna trećina svih troškova održavanja nastaje kao rezultat nepotrebnog ili nepravilno izvedenog održavanja. Tada se u američkoj industriji na održavanje postrojenja, opreme i objekata trošilo oko 200 milijardi dolara svake godine. Očito je kako su produktivnost i profit, između ostalog, usko vezani s održavanjem.

²*European Federation of National Maintenance Societies*

Rezultat neučinkovitog upravljanja održavanjem je gubitak od 60 milijardi dolara svake godine. Bitno je reći da neefektivno održavanje utječe na sposobnost proizvodnje kvalitetnih dobara koja bi bila konkurentna na svjetskom tržištu. Rezultat neadekvatnog održavanja je duže trajanje proizvodnje i lošija kvaliteta proizvoda što dovodi do nekonkurentnosti, uspoređujemo li SAD i Japan koji je uveo napredniju proizvodnu tehnologiju i adekvatno održavanje postrojenja.

Glavni razlog neadekvatnom održavanju je manjak podataka, činjenica koje će kvantificirati stvarnu potrebu za popravkom opreme ili komponente odnosno održavanjem strojeva postrojenja.

Sve do kraja 2002. menadžment je zanemarivao utjecaj održavanja na kvalitetu proizvoda, proizvodne troškove i najbitnije na krajnji profit tvrtke. Općenito vrlo popularno mišljenje je "održavanje je nužno zlo" ili, isto tako, kruži mit da ništa ne može biti učinjeno na smanjenju troškova održavanja. Možda su te izjave bile opravdane prije trideset godina, međutim razvoj mikroprocesora i mjernih instrumenata za monitoring strojeva i opreme u postrojenju znatno je olakšalo mogućnost upravljanja i organiziranja postupka održavanja. Razvojem mjernih instrumenata osigurano je sredstvo za smanjenje i eliminiranje nepotrebnih popravaka, izbjegavanje katastrofalnih kvarova strojeva i smanjenje negativnog utjecaja održavanja na profitabilnost proizvodnih postrojenja.

2.2. Upravljanje održavanjem

Za razumijevanje preventivnog održavanja prvo će se razmotriti tradicionalne metode održavanja. Plansko održavanje može biti i preventivno i korektivno, u preventivno održavanje spadaju planski popravci i podmazivanje, preventivni pregledi, traženje i otklanjanje slabih mjesta te održavanje po stanju.

Industrijska i procesna postrojenja koriste dva tipa održavanja: korektivno i preventivno.

2.3. Korektivno održavanje

Logika ove metode je vrlo jednostavna i jasna, sigurno ju je svatko od nas primijenio barem jednom. Filozofija je sljedeća: *Kada se stroj pokvari - popravi ga, ako stroj nije pokvaren - nemoj ga ni popravljati.* Ovakav način održavanja koristi se otkad proizvodna postrojenja postoje i površno gledajući čini se logičnim.

Na ovakav način tvrtka ne troši nikakva sredstva na održavanje, trošak nastaje tek kada se stroj pokvari.

Korektivnom metodom provodi se jalovo upravljanje održavanjem koje čeka da se stroj ili oprema pokvari prije nego li se provede bilo kakvo održavanje. Ovakav pristup možemo smatrati upravljanjem bez održavanja. Ova metoda je također i najskuplja metoda održavanja. Međutim, neka postrojenja koriste korektivno održavanje na pravilan način. U gotovo svim slučajevima korištenja korektivnog održavanja postrojenja provode osnovne preventivne poslove (npr. podmazivanje, prilagodba stroja i ostale prilagodbe). Kod ove vrste održavanja strojevi i druga oprema održavanja se ne obnavljaju, niti se provode veliki popravci sve dok oprema ne zakaže. Glavni troškovi vezani uz ovu vrstu održavanja jesu visoki troškovi zaliha rezervnih dijelova, česti zastoji strojeva, visoki troškovi prekovremenog rada te niska proizvodna dostupnost.

Budući da postrojenje koje koristi korektivno održavanje ne pokušava predvidjeti potrebe za održavanjem mora moći reagirati na sve moguće kvarove unutar postrojenja. Zbog toga je poduzeće prisiljeno na skladištu držati zalihe skupih rezervnih dijelova koji sadrže sve glavne komponente strojeva. Alternativa je oslanjanje na dobavljača koji im u slučaju kvara mogu omogućiti hitnu dostavu potrebnih rezervnih dijelova. Ako je rezervni dio i moguće dostaviti tako brzo, premije za žurnu dostavu dodatno će povećati troškove rezervnih dijelova kao i vrijeme zastoja stroja i ukupno vrijeme popravka.

Kako bi minimizirali utjecaj neočekivanih kvarova na proizvodnju osoblje održavanja trenutačno mora reagirati na sve kvarove strojeva. Rezultat ovakvog načina održavanja su viši troškovi održavanja i manja raspoloživost strojeva. Analize pokazuju da su za popravke provedene korektivnom metodom troškovi prosječno tri puta veći nego troškovi redovnih i preventivnih održavanja. Redovno održavanje minimizira vrijeme popravka i uz to vezane troškove rada. Također smanjuje nedostatke žurnih pošiljki i gubitak u proizvodnji.

2.4. Preventivno održavanje

Preventivnom metodom održavanje se provodi prije nego li nastupi kvar i to na način da se uklanjaju sve prethodno navedene negativne značajke korektivnog održavanja.

Dakle, preventivnim održavanjem nastoji se otkriti početak degradacije nekog mehanizma s ciljem da se degradacija ispravi prije nego li nastane značajno oštećenje komponente ili opreme. Razvoj senzora znatno je proširio mogućnosti - veća osjetljivost, manji senzori i,

najbitnije, manja cijena otvaraju mnoga vrata preventivnom održavanju, odnosno dijagnosticiranju problema.

Preventivno održavanje vrši se na nekoliko načina. Može biti izvedeno kao *planirano održavanje*, koje se vrši u unaprijed određenim vremenskim intervalima (*time based maintenance*), npr. na temelju broja pređenih kilometara, broja radnih sati, nakon određenog broja radnih ciklusa, ili kao *prediktivno održavanje*.

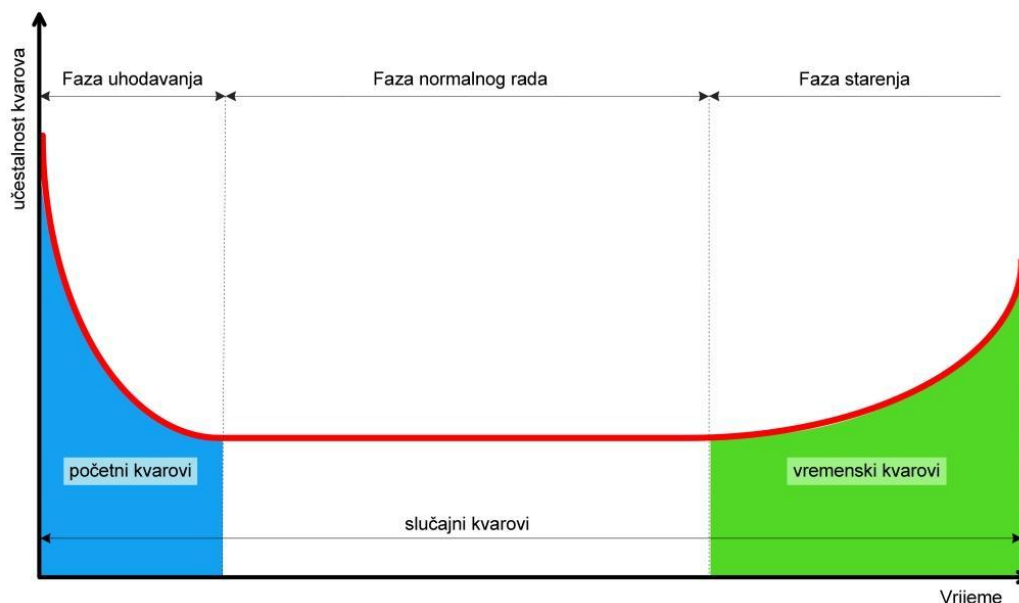
Održavanje razmatrano u ovom radu bit će prediktivno, odnosno održavanje po stanju kod kojeg se potrebe održavanja razmatraju na temelju stanja opreme i cjelokupnog sustava.

2.4.1. Preventivno – plansko održavanje

Kako bi se pojam održavanja po stanju (prediktivno održavanje) mogao u potpunosti shvatiti prvo treba reći nešto o planskom održavanju.

Postoje mnoge definicije planskog održavanja, a zajedničko im je da su ovisni o vremenu, tj. vremenu upravljanja. Procedure održavanja temeljene su na određenom broju sati rada ili određenom broju radnih operacija. Primjer životnog vijeka stroja vidljiv je iz krivulje kade [Slika 1.].

Krivulja kade ili MTTF (*mean-time-to-failure*) ukazuje da novi stroj ima visoku vjerojatnost pojave kvarova, tzv. kvarovi uhodavanja, zbog loše montaže, neodgovarajuće toplinske ili površinske obrade ili pak drugih grešaka koje nastaju od strane konstruktora. Nakon početnog perioda, vjerojatnost da će se dogoditi kvar je relativno mala i to je period rada stroja. No, nakon tog perioda pojavljuju se vremenski kvarovi i vjerojatnost da će se stroj pokvariti raste, a uzrok tome je starenje sustava, zamor materijala, trošenje, povećanje zračnosti, korozija itd. Bitno je naglasiti da u bilo kojem trenutku može doći do slučajnih kvarova, a javljaju se, primjerice, zbog lošeg rukovanja strojem ili zbog nekih unutarnjih faktora (unutarnja naprezanja, ukljućine itd).



Slika 1. Krivulja kade [2]

Implementacija planskog održavanja se razlikuje – neki programi su jako ograničeni i sastoje se od propisanog redovnog podmazivanja i manjih podešavanja. Sveobuhvatni planski programi održavanja raspoređuju popravke, podmazivanja, podešavanja i remonta svih kritičnih dijelova strojeva i opreme postrojenja. Provode se samo na opremi koja je izrazito skupa. Primjer preventivnog planskog popravka nalazi se u zrakoplovstvu, provodi se svakih 6 do 10 godina i naziva se *D-check*. Tada se zrakoplov na nekoliko tjedana izuzima iz prometa radi planskog održavanja, cijeli se zrakoplov rastavlja i svaki dio se provjerava i popravljiva odnosno mijenja. Pregled je toliko detaljan da se sa zrakoplova skida i boja.

Kod upravljanja planskim održavanjem pretpostavlja se da će se vremenom pogoršati stanje stroja ili opreme unutar određenog vremenskog okvira koji je specificiran od strane proizvođača ili iskustveno. Tako primjerice centrifugalna pumpa normalno radi 18 mjeseci prije nego mora na održavanje. Kod planskog održavanja ona bi bila izuzeta iz rada nakon 17 mjeseci. Problem ovakvog pristupa jest da način rada sustava ili postrojenja direktno utječe na fazu normalnog rada uređaja. Srednje vrijeme do kvara kod pumpe kroz koju prolazi voda neće biti jednako kao kod pumpe kroz koju teku neke agresivne smjese ili kemikalije.

Kao rezultat korištenja srednjeg vremena do kvara će dovesti ili do nepotrebnih popravaka ili do katastrofalnih posljedica radi kvara stroja. Pa tako u slučaju pumpe, njenim popravljanjem nakon 17 mjeseci nastali su nepotrebni troškovi maziva, materijala i rezervnih dijelova.

Međutim, kada bi se kvar dogodio prije nego prođe 17 mjeseci troškovi bi bili još veći jer je u tom slučaju korišteno korektivno održavanje za otklanjanje greške, a ono košta i do tri puta više nego plansko održavanje.

2.4.2. Preventivno – održavanje po stanju (prediktivno)

Kao i kod planskog održavanja, postoje mnoge definicije održavanja po stanju. Nekim radnicima održavanje po stanju predstavlja mjerenje vibracija rotirajućih dijelova kako bi se otkrili začeci problema i spriječili katastrofalni kvarovi. Drugima održavanje po stanju predstavlja infracrvena termografija električnih sklopki, motora i druge električne opreme. Dakle, redovno mjerenje stvarnog stanja nekog sustava, radne učinkovitosti i drugih indikatora o radnom stanju višekomponentnog sklopa stojeva može dati podatke potrebne za osiguravanje maksimalanog razmaka između kvarova i minimalanog broja nepredviđenih zastoja zbog kvara stroja i s tim povezane troškove.

Održavanje po stanju koristi niz tehnologija s ciljem postizanja i održavanja optimalnog pogonskog stanja strojeva i pojedinačnih komponenata tako da se mjerenjem i određivanjem tendencija fizikalnih parametara u usporedbi s poznatim graničnim vrijednostima ili specifikacijama već unaprijed otkriju, analiziraju i otklone potencijalni problemi strojeva, prije nego nastane kvar. [3]

Održavanje po stanju znači i više od toga. Predstavlja sredstvo za poboljšavanje produktivnosti, kvalitete proizvoda i ukupne djelotvornosti proizvodnje i proizvodnih postrojenja. Održavanje po stanju nije samo analiza vibracija, termografija, spektrografska analiza ulja ili neka druga vrsta nerazornog ispitivanja. To je princip po kojem se stvarno stanje opreme i sustava postrojenja koristi kako bi se optimizirao cjelokupni rad postrojenja. Kod ove metode koristi se skupa dijagnostička oprema kako bi se dobilo stvarno radno stanje kritičnih dijelova postrojenja. Na temelju tih podataka se aktivnosti održavanja raspoređuju po potrebi. Implementiranjem održavanja po stanju u sustav održavanja postrojenja optimizira se raspoloživost opreme i smanjuju se troškovi održavanja. Ujedno se poboljšava kvaliteta proizvoda, produktivnost i profitabilnost proizvodnje i proizvodnih postrojenja što direktno utječe na konkurentnost tvrtke na svjetskom tržištu.

Održavanje po stanju je preventivna metoda održavanja koja je, kao što sama riječ kaže, upravljana stanjem opreme ili postrojenja. Umjesto da se oslanja na statistiku odnosno srednje

vrijeme do kvara za raspoređivanje aktivnosti održavanja, koristi se monitoring stvarnog mehaničkog stanja, učinkovitosti sustava i drugih pokazatelja kako bi se utvrdilo stvarno srednje vrijeme do kvara ili smanjenje učinkovitosti za sva postrojenja i sustave u tvornici. U najboljem slučaju tradicionalne metode održavanja upravljane vremenskim razmacima među kvarovima daju smjernice o normalnom životnom vijeku postrojenja.

Konačna odluka o planovima popravaka ili remonta kod preventivne i korektivne metode održavanja donosi se na temelju iskustva i intuicije voditelja održavanja.

Implementacija održavanja po stanju dat će podatke temeljenje na stvarnim činjenicama o stvarnom mehaničkom stanju svakog tehničkog sustava i radne učinkovitosti svakog procesa unutar sustava. Na taj se način voditelju održavanja pružaju realni podaci o stanju opreme kako bi mogao kvalitetno isplanirati poslove održavanja. Preventivna metoda održavanja može smanjiti neplanirane zastoje gotovo sve mehaničke opreme u postrojenju i osigurati uvjete prihvatljive za ispravan rad opreme. Ovom metodom mogu se prepoznati problemi u postrojenju kako ne bi prerasli u veće probleme s ozbiljnim posljedicama, zastojima i kvarovima. Većina mehaničkih kvarova mogu biti minimizirani ukoliko se greška pronađe i popravi u ranim fazama. Uobičajeni mehanički kvar degradira brzinom proporcionalnom težini. Ako je problem otkiven na vrijeme veći popravci opreme mogu se uspješno izbjeći.

Preventivno održavanje analizom vibracija temelji se na dvije osnovne činjenice:

1. svaki tip kvara ima karakterističnu komponentu vibracijskih frekvencija koje se mogu filtrirati i definirati;
2. amplituda svake pojedine vibracijske komponente će ostati konstantna ukoliko dinamika tehničkog sustava ostane nepromijenjena.

Ove činjenice, njihov utjecaj na tehničke sustave te metode kojima će se identificirati i kvantificirati glavni razlog kvara detaljno će biti opisani u radu.

Održavanje po stanju korištenjem učinkovitosti procesa, termografije i drugih nerazornih ispitivanja mogu povećati radnu učinkovitost nemehaničke opreme postrojenja. Ove tehnike

korištene u kombinaciji s vibracijskom analizom vođačeljima održavanja mogu pružiti informacije koje će omogućiti postizanje optimalne pouzdanosti, raspoloživosti opreme i cjelokupnog postrojenja.

Najčešće se koristi pet metoda nerazornih ispitivanja u svrhu preventivnog održavanja: vibracijska analiza, vizualne metode, termografija, monitoring parametara i ferografska analiza čestica. Svaka metoda daje jedinstvene rezultate i na taj način pridonosi ukupnoj slici o stvarnom stanju sustava te pomaže vođačelju održavanja da donese odluku o potrebi za održavanjem.

Kako odrediti koja metoda ili koje su metode održavanja najbolje za postrojenje? Kako odrediti najbolji način implementiranja pojedinih tehnika održavanja? Kako odvojiti loše od dobrog?

Često se vibracijska analiza koristi kao primarna tehnika preventivnog održavanja jer većina postrojenja ima puno mehaničkih komponenti u sustavu. Vibracijska analiza je najbolji alat za rutinski monitoring i identifikaciju početnih problema. Međutim, ona ne može pružiti potrebne podatke o stanju električnih sklopova, područja gubitka topline, stanje ulja za podmazivanje.

3. ANALIZA I MJERENJE VIBRACIJA

3.1. Osnove vibracija

Pojavom mikroprocesora proces prikupljanja i analize podataka o vibracijama silno je napredovao. Mjerenja koja su prije dvadeset godina zahtjevala puno sati rada danas se mogu izvršiti u samo nekoliko minuta i mogu se donijeti bolje odluke zbog boljeg prikaza izmjerenih podataka. Izvorni principi mjerenja i analize ostali su gotovo nepromijenjeni kao i strojevi na kojima se vibracija mjeri. Rezultati mjerenja i analize podataka trebaju se usporediti s predefiniranim standardima ili smjernicama na temelju kojih se donosi odluka o stanju stroja - da li je stroj u dovoljno dobrom stanju za daljni rad ili je potrebno održavanje.

Sve se više takvi procesi odrađuju elektroničkim putem, no još je jako daleko zamjena fundamentalnih znanja i iskustva vibracijskog stručnjaka.

Proučavanjem dane literature lako se shvaća bit vibracija u održavanju, no zanimljivo je i ono što se krije iza svih formula i iza onog tehničkog. I otkucaje srca, disanje, dnevne rutine možemo promatrati kao periodične oscilacije.

U radu su dani osnovni principi mjerenja i analize vibracija koji bi trebali biti temelj za razvoj sposobosti dijagnosticiranja kvara.

Jednostavni uređaj može se prikazati kao sustav koji se sastoji od mase, opruge i prigušivača [Slika 2.]. Ako se navedeni model s jednim stupnjem slobode gibanja uzbudi sa sinusoidalnom silom $F(t)$, onda se raspodjela sila generiranih rezultirajućim dinamičkim pomakom x može odrediti iz sljedeće jednadžbe (1) gdje je [15]:

m – masa,

c – konstanta prigušivača,

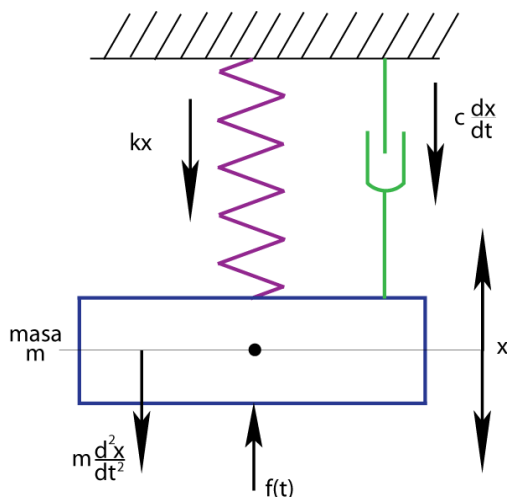
k – konstanta opruge,

\ddot{x} – ubrzanje,

\dot{x} – brzina,

x – pomak.

$$F(t) = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad (1)$$



Slika 2. Sustav masa-opruga-prigušivač [15]

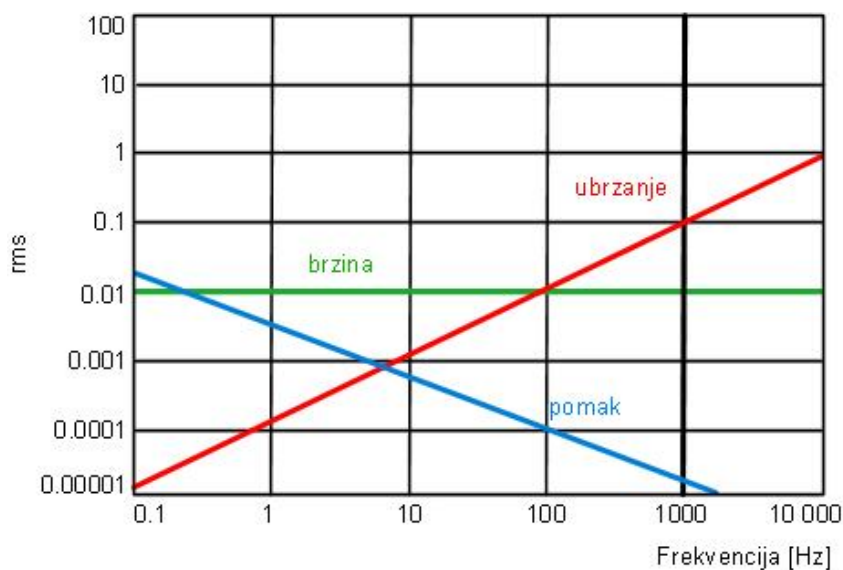
Jednostavni uređaj se može vrlo lako povezati s nečim poznatijim kao što je neovisni prednji ovjes automobila [Slika 3.]. Pomak x bi se mogao promjeniti krutošću opruge, stupnjem prigušenja amortizera i masom kotača vozila.



Slika 3. Neovisni prednji ovjes (Volvo) [16]

Donji graf [Slika 4.] prikazuje vezu između brzine pomaka i ubrzanja za sinusnu (jednofrekventnu) vibraciju. Može se primjetiti da su amplitude pomaka na frekvencijama iznad 100 Hz vrlo niske. Iz tog razloga seizmička mjerenja pomaka rijetko se koriste za praćenje stanja stroja. Korisniji su za monitoring strukturnih vibracija, a koriste se kod nosivih konstrukcija npr. mostova, krila zrakoplova, helikoptera, satelita.

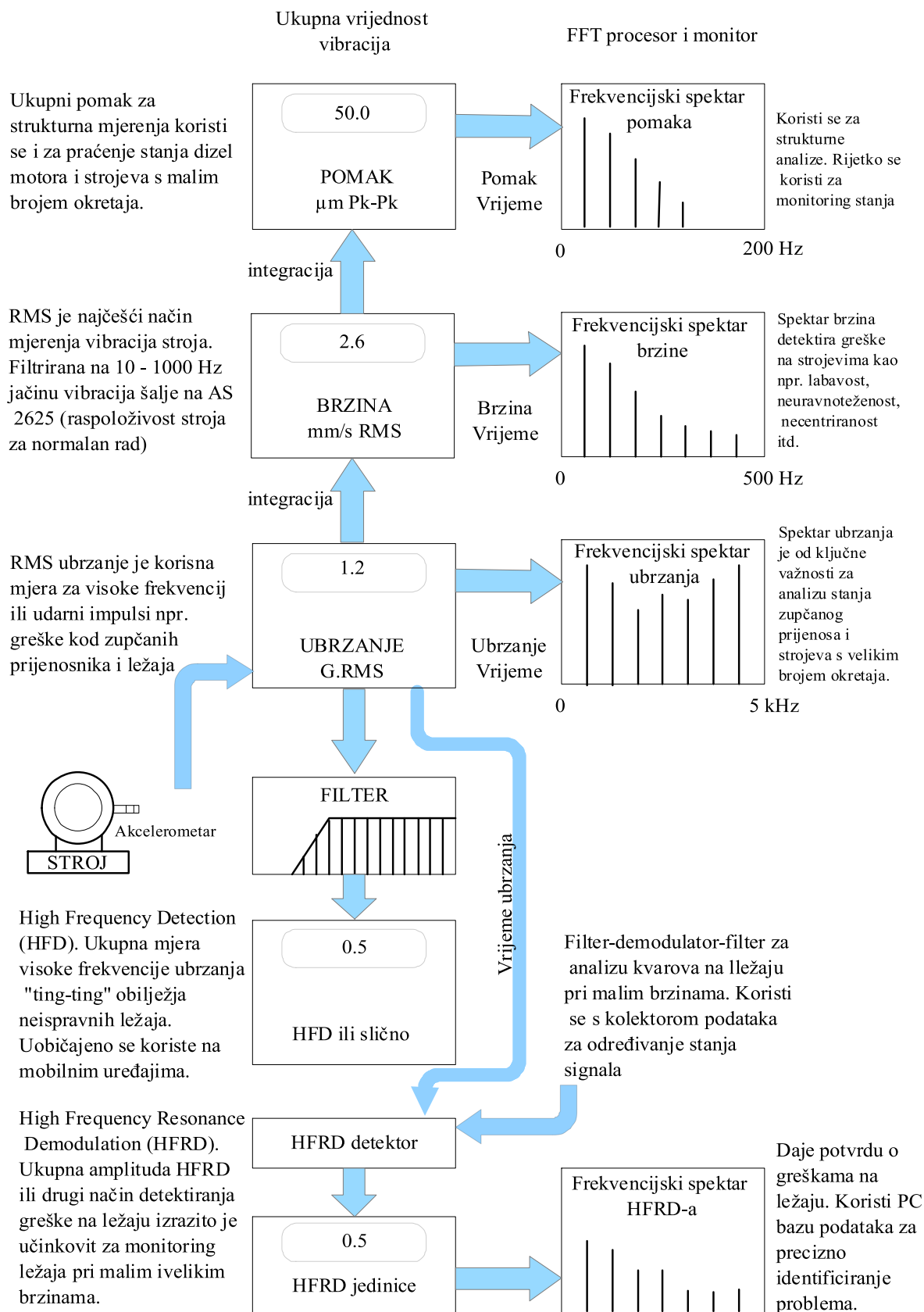
Brzina tendira ujednačenom odzivu na širokom rasponu frekvencije stroja pa je univerzalno mjerilo procjene integriteta stroja u odnosu na ravnotežu, labavost, centriranost i slično. Ubrzanju raste relativna amplituda s porastom frekvencije te je zbog toga idealan izbor za monitoring komponenata koji generiraju visoke frekvencije vibracija kao što su na primjer ležaji, prijenosnici snage i gibanja (npr. vijčani kompresori). Visoko frekventni akcelerator se koristi za mjerenje stanja rotacijske opreme i sve su mjere izražene u jedinicama ubrzanja. [15]



Slika 4. Veza između pomaka, brzine i ubrzanja za sinusnu vibraciju [15]

3.2. Mjerenje vibracija

Dijagram sa slike 5. prikazuje opći dogovor za mjerenje vibracija koristeći akcelerator.



Slika 5. Dijagram procesa mjerenja i analize vibracija [15]

3.2.1. Ukupna vrijednost vibracija

Izlazna vrijednost akcelerometra je AC oblik signala koji prikazuje ubrzanje vibracija. Takav oblik signala za dijagnozu kvara može biti od koristi iskusnom vibracijskom stručnjaku, ali uglavnom se ne koristi u tu svrhu. Praktičnije je mjeriti ukupnu snagu signala te nakon toga prikazati kao DC vrijednost. Takvu veličinu tada nazivamo ukupna vrijednost vibracija. Kako bi se dobila ukupna vrijednost moramo pomoću RMS-a (*Root Mean Square*) proračunati AC signal. Starijim akcelerometrima veličina RMS-a proračuna se korištenjem jednostavnih analognih sklopova. Moderni uređaji za analizu strojeva čine isto, ali putem kompleksnog procesa digitalizacije signala. Ukupna vibracijska mjerenja obično se izražavaju kao RMS vrijednosti (osim pomaka gdje se primjenjuju vrijednosti peak-peak³ odnosno vrh-vrh) i formiraju osnovu za praćenje stanja mjerenja i pravac razvoja, ali imaju ograničene vrijednosti analize. [15]

Prethodni dijagram [Slika 5.] prikazuje tipičnu vrijednost vibracije od 1,2 g RMS. Ubrzanje se može izraziti i u m/s^2 ili gravitacijskim jedinicama "g" gdje je 1 g otprilike jednak $9,81 \text{ m/s}^2$. Ako se želi znati ukupna vibracijska brzina, mjerni uređaj to može izračunati i ispisati u mm/s RMS. Ovo je integracija signala ubrzanja. Dijagram prikazuje tipičnu vrijednost od 2,6 mm/s RMS.

Ponekad bi bilo korisno znati amplitudu pomaka. To je dvostruka integracija signala ubrzanja. Pomaci se uvijek izražavaju u mikrometrima peak-to-peak. Dijagram prikazuje vrijednost od 50 μm od vrha do vrha. Uobičajeno je pogledati ukupne vrijednosti ubrzanja i brzine iz drugog pravca kako bi se pronašle povećanja ili nestabilnosti ukupnih vrijednosti. To je najosnovniji oblik praćenja stanja vibracija. [15]

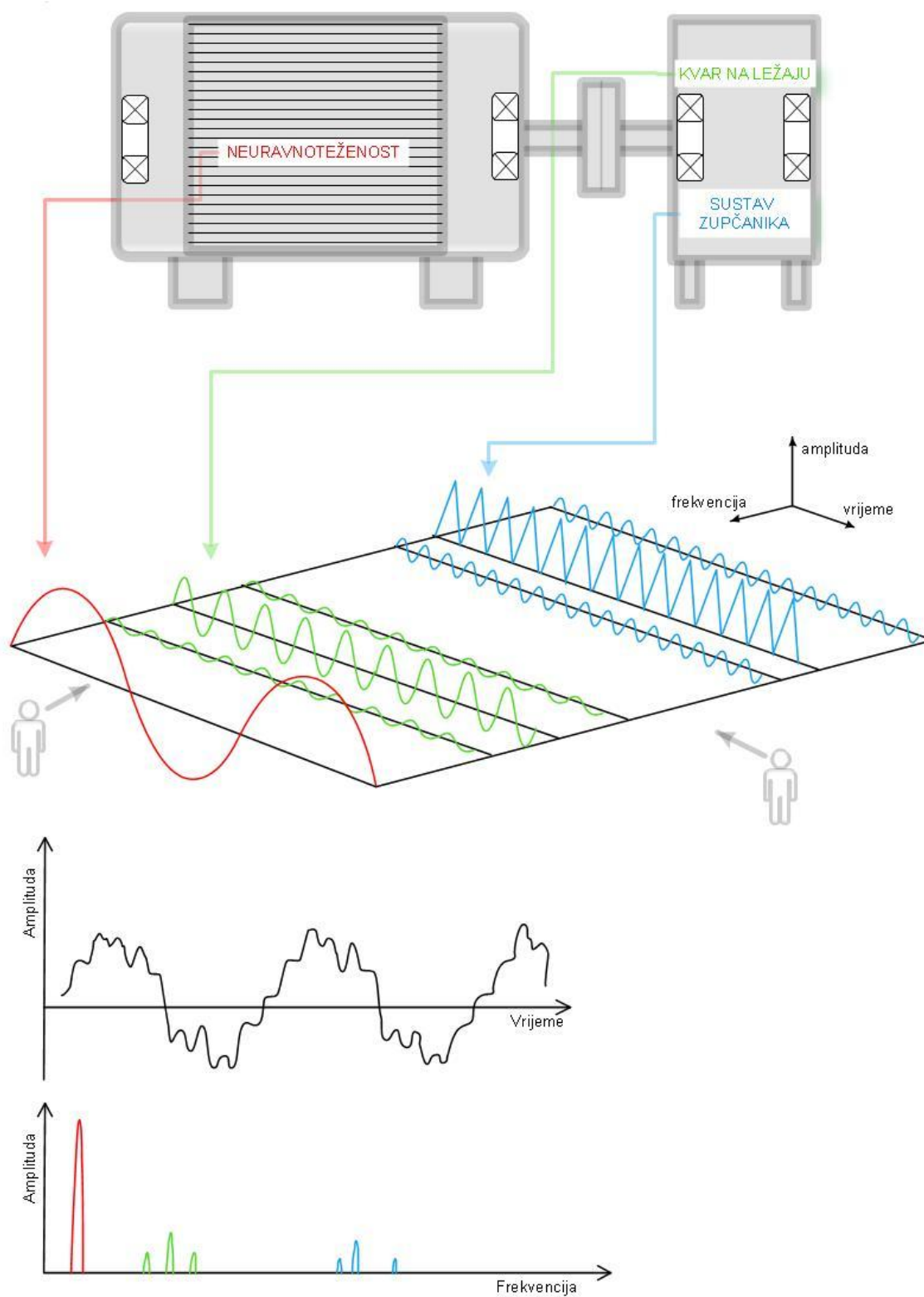
3.2.2. Računanje frekvencijskog spektra

Desni stupac dijagrama [Slika 5.] pokazuje da se vremenska domena može pretvoriti u frekvencijsku domenu kako bi se vidjelo odakle energija vibracije dolazi. Analiza frekvencija je suština u analizi vibracija i omogućuje rješavanje većine problema sa strojevima. Bitno je shvatiti vezu između vremenske domene i frekvencijskog spektra.

Na sljedećem dijagramu [Slika 6.] može se vidjeti motor koji proizvodi tri različita oblika vibracija. Postoji vibracija zbog neuravnoteženosti, vibracija zupčanika i vibracija ležaja. Akcelerometar postavljen na jednoj točki motora mjerit će kompleksnu vibraciju

³ Peak-peak (Pk-Pk) - amplituda od vrha do vrha je udaljenost od negativnog do pozitivnog vrha.

valnog oblika kao što je prikazano u vremenskoj domeni na lijevoj strani (zbroy svih vibracija prisutnih na tom mjestu).



Slika 6. Primjer motora koji proizvodi tri različite vrste vibracija [15]

Analiza spektra omogućuje raspletljavanje kompleksnog valnog oblika i prikaz njegovih originalnih komponenata na dijagramu s frekvencijom na x-osi i amplitudom na y-osi. To se zove vibracijski spektar i od velike je koristi pri dijagnosticiranju kvara.

Način na koji je dijagram nacrtan pokazuje da je taj proces poput promatranja vibracija iz dva različita pravca s pravim kutom između njih. Iz vremenske domene se vidi suma svih individualnih frekvencija, dok se iz frekvencijske domene vidi lokacija i amplituda za svaku frekvencijsku komponentu.

Pretvorba iz vremenske u frekventnu domenu postiže se korištenjem *Fourierovog transformata* (Fast Fourier Transform – FFT). Osnovno načelo prvi puta je pretpostavio Jean Baptiste Joseph Fourier⁴ u 19. stoljeću izjavom da se bilo koja periodična krivulja bez obzira na to koliko kompleksna bila, može smatrati nizom čistih sinusnih krivulja s harmonijski povezanim frekvencijama. [15]

3.2.3. *Daljnje objašnjenje ispravnog korištenja spektar analize*

Inženjer koji koristi FFT sustave mora razumjeti nekoliko bitnih tehničkih pojmova tog područja [15]:

- a) *Niskopropusni ili anti-aliasing filteri*. Prvi korak koji je potrebno napraviti je pretvaranje podataka u digitalni oblik. Osnovno pravilo koje se mora poštivati pri pretvorbi analognih podataka u digitalne jest osiguravanje niskopropusnog filtera kako signal koji treba pretvoriti u digitalni ne bi sadržavao frekvencije iznad polovice uzorkovanih frekvencija. To je poznato pod nazivom Nyquistov kriterij. Idealna frekvencija uzorkovanja ne bi smjela biti manja od 2,65 puta najveće frekvencije od podataka koje treba obraditi. Ovo je također izrazito bitno uzeti u obzir pri korištenju *data loggera* odnosno prikupljača podataka (A/D pretvarača) za bilježenje finamičkih podataka. Ukoliko se filteri ne primjenjuju, u spektru će se pojaviti lažne nisko frekventne komponente koje inženjera vrlo lako mogu dovesti u zabludu.
- b) *Funkcija prozora (window function)*. FFT proces zahtjeva da se diskretni blokovi digitaliziranih vremenskih podataka uzimaju i stavljaju u procesor. Kako bi se izbjegle greške u procesu nužno je vrijednosti na početku i na kraju uzorka sažeti u nulu, što

⁴ Jean Baptiste Joseph Fourier - francuski matematičar i fizičar, poznat po Fourierovim redovima i njihovoj primjeni na probleme prijenosa topline.

nema bitnog utjecaja na točnost rezultata. Proces sažimanja se naziva *prozor*. Postoji niz različitih prozora koji se mogu koristiti kako bi se postigla određena obilježja spektra. Za pomoć ovim tehnikama filtriranja, mnogi analizatori nude različit broj 'prozorskih' funkcija koje, ovisno o odabranom tipu, pomažu pri analizi prikupljenih podataka. Ovdje će se razmatrati samo tri.

1. *Hanning prozor*. Najčešći, standardan za većinu vibracijskih analiza, ima najveću točnost za frekvencijsku rezoluciju, ali nešto veću netočnost u amplitudnoj domeni. U većini slučajeva dobra frekvencijska rezolucija je izrazito korisna pa se neprecizne amplitudne pogreške mogu prihvatiti.
 2. *Prozor ravnog vrha (flat top window)*. Ima najveću točnost za amplitudnu domenu, ali veću netočnost za frekvencijsku rezoluciju.
 3. *Bez prozora (uniform)*. Učinkovitiji je tamo gdje 'prozor' nije nužno potreban kao što je to slučaj s prolaznim podacima kao što su testovi na udare.
- c) *Uprosjecivanje (averaging)*. U procesu prikupljanja podataka uobičajeno je uzeti srednju vrijednost uzoraka kako bi se osigurao što reprezentativniji rezultat. Tri česta načina računanja srednje vrijednosti su:
1. *RMS*: zbroj prosjeka uzastopnih uzoraka podataka. Slučajni podaci poput buke tendiraju k tome da su izvan prosjeka. Obično se za RMS uzima 8 do 16 uzoraka.
 2. *Eksponencijalno*: korisno kod podataka koji sporo variraju u frekvenciji ili amplitudi. 99 % podataka se obično nalazi u posljednjih pet uzoraka. Koristi se samo za specijalne analize.
 3. *Peak hold (zadržavanje najvišeg)*: zapravo ne predstavlja prosječnu vrijednost, ali se koristi kao sredstvo za pohranjivanje najviših vrijednosti tijekom uzorkovanja. Profil koji je tada prikazan je maksimalna amplituda u svakom frekvencijskom rasponu. To može biti korisno u analizama pri pokretanju i zaustavljanju stroja kako bi se otkrile njegove rezonance ili strukture.
- d) *Okidač (trigger)*. FFT procesu potreban je okidač kako bi se započelo prikupljanje podataka. Početna postavka je automatski unutarnji okidač, međutim može biti i ručno upravljano ukoliko je potrebno. Primjerice, vanjski se optički tahometar koji gleda na komad trake na vratilu stroja može koristiti za pružanje podataka o fazi, a impuls tahometra bit će okidač. Postupak vremenskog sinkronog uprosjecivanja (koristi se za

poboljšanje vremenske domene - prigušuje se buka) potrebno je pokretati impulsom tahometra.

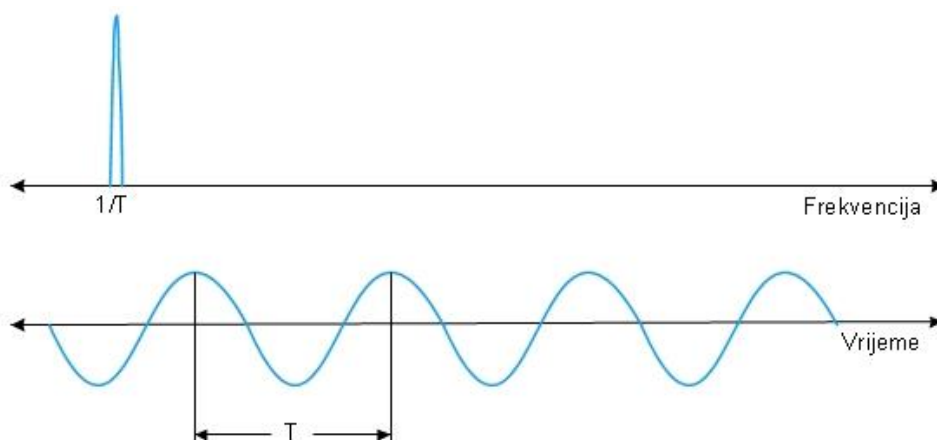
- e) *Širina frekvencijskog pojasa i rezolucija.* Os frekvencije spektra ima unaprijed određeni broj digitalnih uzoraka. Za održavanje po stanju uobičajeno je da frekvencijska rezolucija sadrži set od 400 uzoraka. Većina uređaja za analizu strojeva mogu pružiti 3 200 uzoraka i više, čime se može dobiti spektar bolje frekvencijske rezolucije. Iako se ovo može činiti korisnim, zapravo samo produžuje vrijeme obrade signala i time uvelike usporava brzinu obrade podataka. Dakle, za kvalitetnu frekvencijsku rezoluciju treba imati na umu da će se brzina obrade podataka uvelike smanjiti kao i prostor za digitalnu pohranu podataka. Također, i širina frekvencijskog pojasa je kompromis. Iako bi moglo biti korisno da spektar brzine pokriva pr. 2 000 Hz, sa spektrom od 400 uzoraka rezolucija bi bila oko 5 Hz po uzorku. To je poprilično neprihvatljivo za većinu namjena.

3.3. Veza između frekvencije i vremena

Do sada je razmatran proces pretvaranja iz vremenske domene u frekvencijski spektar. Prije nego li se krene dalje bilo bi korisno razmotriti neke osnovne vremensko-frekvencijske veze.

3.3.1. Dominantna pojedinačna frekvencija

Tamo gdje je izvor vibracija većim dijelom sinusoidalnog oblika veza između vremenske i frekvencijske domene izgledati će kao na slici prikazanoj dolje [Slika 7.].



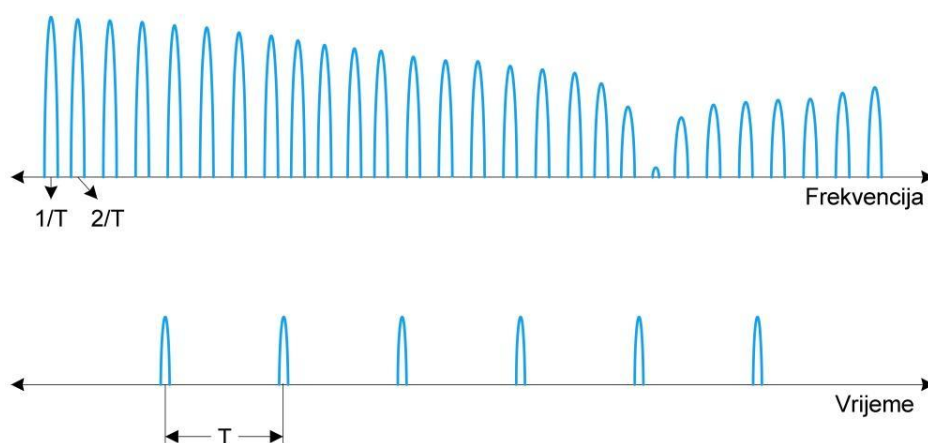
Slika 7. Sinusoidalna frekvencija [15]

Ovaj tip signala karakterističan je za neuravnoteženost ili vratila gdje je sila koja uzrokuje vibraciju povezana s rotacijom vratila.

3.3.2. Udarno opterećenje

Udarno opterećenje se može smatrati suprotnim od pojedinačnog frekvencijskog signala jer su do nekog stupnja sve frekvencije prisutne. Može biti nekoliko varijacija u karakteru. 'Savršeni' udar će proizvesti energiju duž spektra kao što je prikazano na slici 8. – dijagram gore. To je princip *testa s čekićem* koji se koristi kako bi se uzbudile i identificirale strukturne rezonancije. [15]

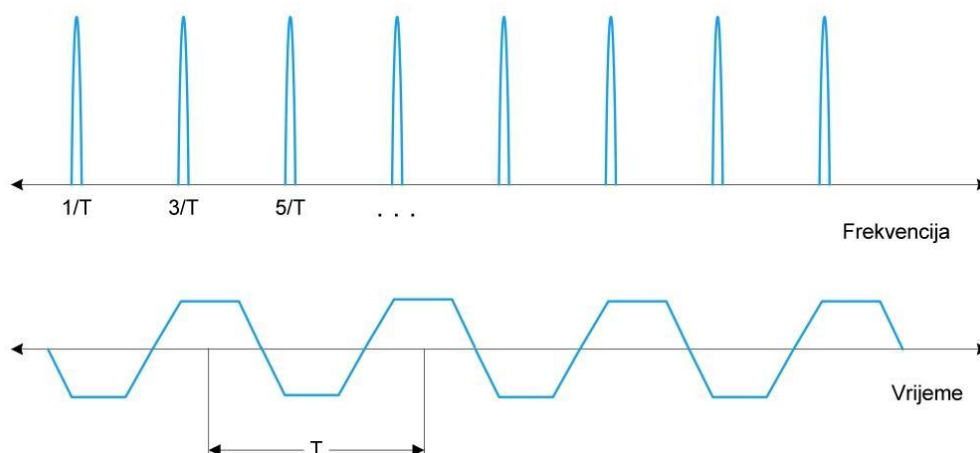
Kod strojeva udari su ponavljajući i periodični kao oni koji proizlaze iz labavosti ili slomljenog zuba zupčanika. U tom slučaju spektar će biti bogat harmonicima raspoređenih po ponavljajućoj frekvenciji kao što je prikazano na slici 8 – dijagram ispod.



Slika 8. Savršena udarna frekvencija (gore) i ponavljajuće frekvencije (dolje) [15]

3.3.3. Trapezni val

Negdje između sinusoidalnog vala i ponavljajućih udarnih valova nalazi se trapezni val. Ovo je idealistički koncept koji se rijetko koristi. Karakteristični uzorak ima neparne redove u spektru koji se smanjuju po amplitudi [Slika 9.].

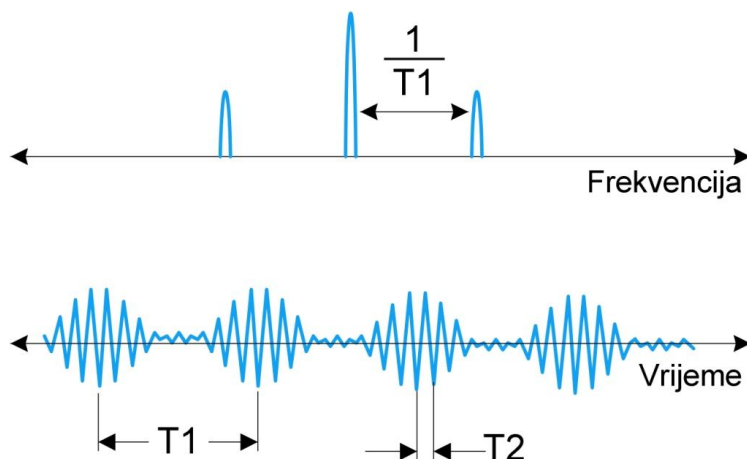


Slika 9. Trapezni val u frekvencijskoj i vremenskoj domeni [15]

Ovakav uzorak se može vidjeti kod nekih slučajeva labavosti i necentriranosti i bit će vrlo uočljiv u vremenskoj domeni.

3.3.4. Modulacija

Jedinična frekvencija (prijenosna frekvencija) mijenjat će se po amplitudi pri nižoj frekvenciji. Primjer je vratilo koje u sustavu zupčanika uzrokuje da mreža frekvencija bude promijenjena po amplitudi pri rotacijskoj frekvenciji vratila.



Slika 10. Modulacija [15]

Prijenosna frekvencija izgleda kao sinusni val, ali ima manje komponente s obje strane poznate pod nazivom *sidebands* - bočni pojas [Slika 10.]. Razmak između prijenosne

frekvencije i bočnih pojaseva je frekvencija koja odgovara vremenskom periodu modulacije. Ovo je izrazito moćan alat pri dijagnostici kvarova na zupčanicima. [15]

3.4. Rezonancija dinamičkih sustava

3.4.1. Rezonancija

Razine vibracija koje proizlaze iz prisilnih vibracija na strojevima koji su dobro dizajnirani, proizvedeni, izbalansirani, montirani i poravnati su obično poprilično niske i duge te se s mehaničkog stajališta može se očekivati sasvim dobar vijek trajanja. Ponekad nastaju situacije u kojima masa, prigušenje i krutost mogu proizvesti vrlo nepoželjne rezultate.

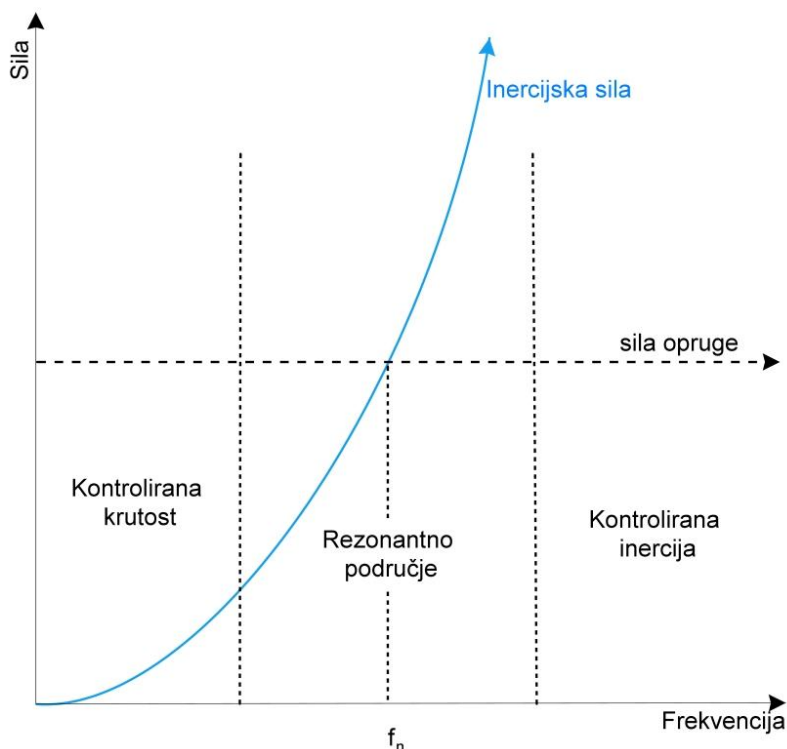
Ako se iz jednadžbe (1) s početka ukloni vanjska pobuda, dobiva se sljedeća situacija [15]:

$$\begin{aligned} F(t) &= 0 ; \\ m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= 0 . \end{aligned} \quad (2)$$

Ova jednadžba definira slobodno gibanje mase kao samostalni sustav, a njeno rješenje će za neko vrijeme t definirati vlastitu frekvenciju sustava. Koristan način razumijevanja sustava jest grafički prikaz. Ako se uzme da je koeficijent prigušenja c tako mali da se može zanemariti, jednadžba se može preblikovati [15]:

$$m\ddot{x} = -kx . \quad (3)$$

Ako se napravi graf pomoću prethodnih vrijednosti, dobije se situacija sa slike 10. Treba imati na umu da su negativne i pozitivne vrijednosti nametnute zbog jednostavnosti.



Slika 11. Ovisnost frekvencije o sili [15]

U sjecištu gdje su vrijednosti jednake, bilo kakva sila kojom se djeluje na toj frekvenciji uzrokovat će gibanje sustava pri beskonačnoj amplitudi. To bi dovelo do samouništenja. Ovaj slučaj je poznat pod nazivom vlastita frekvencija sustava, a koincidencija uzbude s vlastitom frekvencijom smatra se rezonancijom [15].

Naravno, ovdje je pretpostavka bila da nema prigušenja pa se točno može zaključiti koja je njegova svrha. Iako se brzina povećava poprilično sporo koeficijenti prigušenja imaju značajan utjecaj pri apsorpciji energije kako ne bi došlo do samouništenja sustava.

Vibracija koja se javlja pri vlastitoj frekvenciji zove se slobodna vibracija i svoju korist pokazuje svakodnevnim stvarima kao što su zvona, glazbeni instrumenti i, pri puno većim frekvencijama, radio postaje [15].

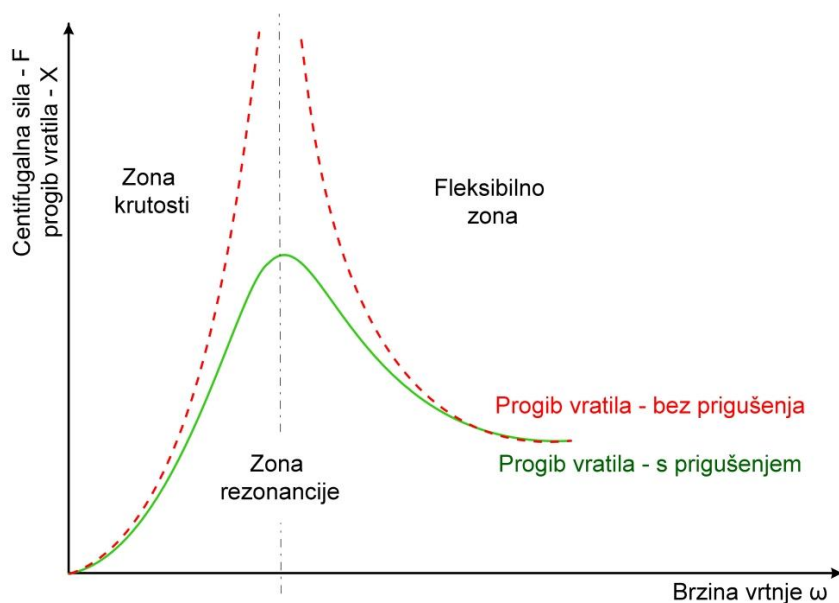
Svi su zasigurno vidjeli video snimak *Tacoma mosta* u Washingtonu. U tom slučaju je uzbuda odgovarala izrazito slabo prigušenoj vlastitoj frekvenciji mosta, što je dovelo do destruktivnih amplituda vibracija.

Pojačanje vibracija zbog rezonancije strojeva ili struktura događa se vrlo često i većinom je to odraz lošeg razmatranja dizajna. Stručnjaci na području vibracija zarađuju jako puno rješavajući probleme sa strojevima i strukturne probleme koji proizlaze iz rezonancije.

3.4.2. Upravljanje rezonancijom

Klasična krivulja razonatnog sustava prikazana je na sljedećem dijagramu [Slika 12.]. Dok se frekvencija neke sile približava vlastitoj frekvenciji sustava, amplituda vibracija se povećava. To područje je poznato pod nazivom zona krutosti (*rigid zone*) i opisuje ponašanje većine strojeva čvrsto pričvršćenih vijcima na velike betonske temelje [15].

Temelji služe kako bi se dijelovi konstrukcije preko njih oslonili o tlo, odnosno da bi se djelovanja na konstrukciju prenijela na tlo. Tlo je u pravilu bitno mekši i slabiji materijal od materijala od kojih je izgrađena konstrukcija. Temelj kao prijelazni dio služi za preraspodjelu unutrašnjih sila vitkih i tankih elemenata konstrukcije (stroja) na velike zone tla. [15]



Slika 12. Klasična krivulja rezonancije sustava [15]

Na desnoj strani dijagrama vidi se fleksibilna zona. U tom području sile koje nastaju u stroju ne prenose se do temelja nego se većinom raspršuju u samom stroju. To je princip izolacije vibracija o čemu će biti riječi u daljnjem tekstu.

Područje koje treba imati na umu je zona rezonancije u kojoj su vibracije jače i gdje će se problemi zamora materijala ili dinamičkog preopterećenja sigurno pojaviti. Treba uočiti da je amplituda bilo koje komponente vibracijske frekvencije proporcionalna s mjestom sjecišta na odzivnoj krivulji sustava. U točki maksimalne rezonancije bilo kakva promjena frekvencije smanjit će amplitudu vibracija. Kako se uzbuda udaljuje od vlastite frekvencije tako se

ukupna vibracija smanjuje. Krivulja također pokazuje da nije moguće pobuditi vlastitu frekvenciju forsiranjem frekvencija koje su u pola manje ili duplo veće od vlastite frekvencije osim ako postoje harmonici koji odgovaraju vlastitoj frekvenciji.

Rješenje kod problema s rezonancijom je uglavnom ukrućivanje strukture ili stroja. Kao efekt toga proizlazi povećana vlastita frekvencija. Ponekad može biti praktično dodati masu kako bi smanjili vlastitu frekvenciju.

Optimalna ispitivanja i mjerenja za identifikaciju i ispravljanje vlastitih frekvencija su sljedeća:

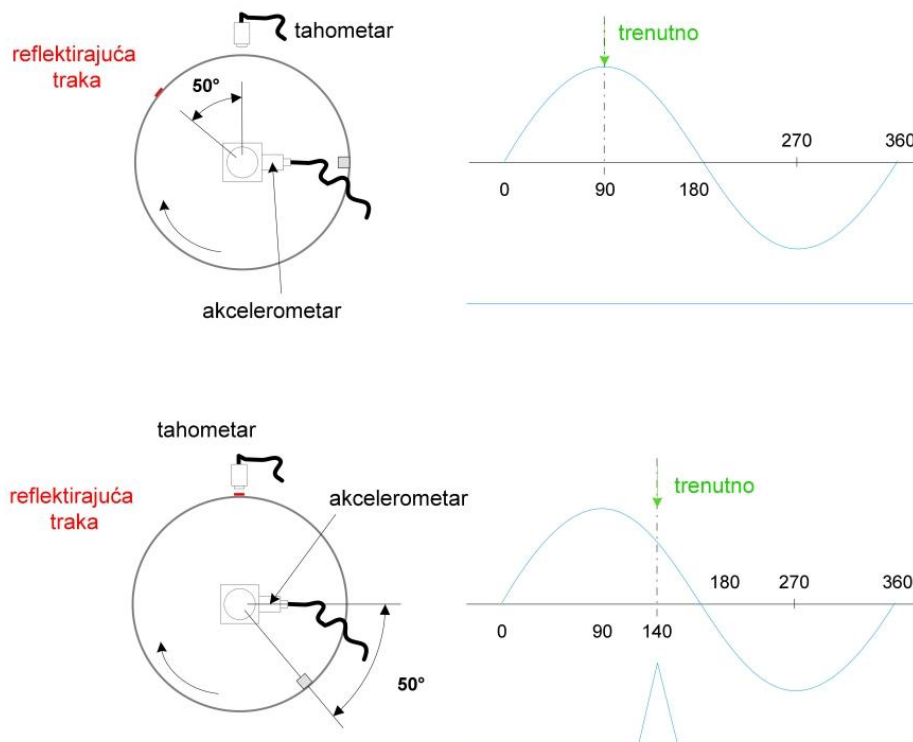
- *test čekićem* - kako bi identificirali vlastite frekvencije;
- *Operating Deflection Shape* (ODS) - ispitivanja kojima se proučavaju oblici progiba (vidjeti poglavlje Oblik otklona tijekom rada (ODS));
- *metoda konačnih elemenata* - računaju se vlastite frekvencije i uspoređuju s mjerenjima;
- *testovi pokretanja i zaustavljanja* - kako bi se proučavale fazne i amplitudne promjene.

3.5. Faze

U vibracijskom jeziku faza opisuje vezu između točke na vratilu i valnog oblika okretanja vratila. Može biti i odnos u vremenu između dva ili više valnih oblika jediničnih frekvencija.

Sljedeći dijagram [Slika 13.] prikazuje principe mjerenja faze korištenjem jednog kanala uređaja za analizu vibracija na jednostavnom stroju. *Heavy spot* definira *high spot* na vibracijskom valnom obliku i uspoređujući to s impulsom optičkog tahometra koji nastaje prolaženjem reflektirajuće trake postavljene na bilo kojem mjestu na vratilu uočava se fazna karakteristika. To su osnove za postupak *in-situ* balansiranja. Nanošenjem probne težine na rotor mijenja se lokacija heavy spot-a te se korištenjem jednostavne vektorske računice njegova prava lokacija može naći. Tada se pak može nanijeti korekcijska masa (uteg) ili se može ukloniti masa (postavljanje utega se često provodi pri balansiraju kotača na automobilima jer i mala razlika balansa pri velikim brzinama može uzrokovati teže upravljanje automobilom). [15]

Faza se može mjeriti i između dvije ili više simultanih vibracijskih valova korištenjem multi kanalne opreme za analizu vibracija. Ta tehnika se koristi za proizvodnju fazno-referentnih vibracijsko amplitudnih dijagrama iz kojih se mogu izračunati operativni oblici otklona.



Slika 13. Principi mjerenja faze [15]

3.5.1. Fazni pomak na rotirajućim vratilima

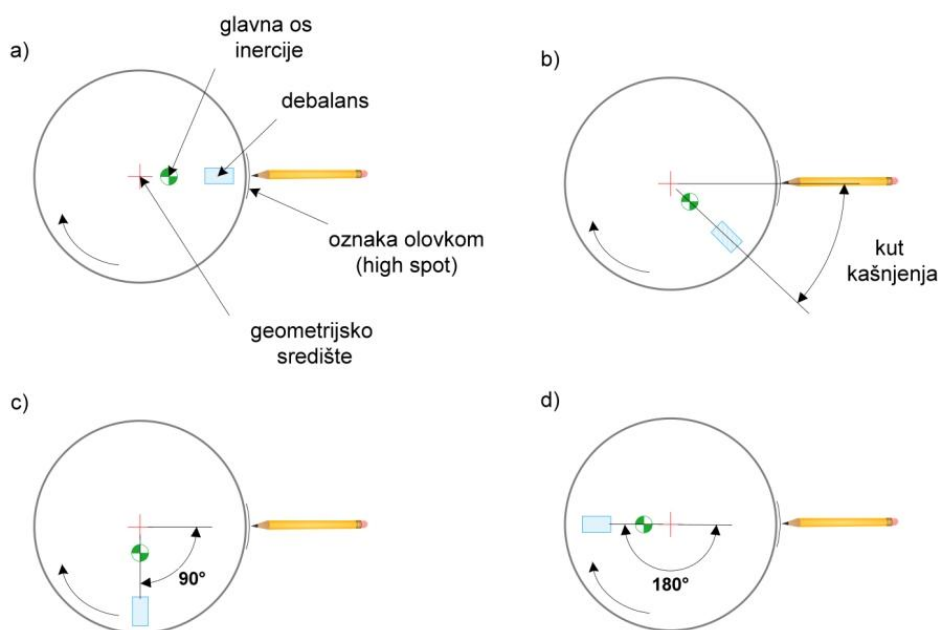
Vlastita frekvencija sklopa rotirajućih vratila naziva se kritična frekvencija, a izrazito veliki otkloni pri kritičnoj frekvenciji ima naziv *Shaft Whirl* odnosno "lepršanje". Događa se kada je stroj pušten u rad i kada mora brzo preći kritičnu brzinu vrtnje odnosno vlastitu frekvenciju vibriranja koja je uvijek puno niža od radne frekvencije stroja. Uzbuđu tih vibracija stvara centrifugalna sila koja je posljedica neuravnoteženosti rotora.

Kritičnu frekvenciju vratila nije lako odrediti *testom čekićem* zbog, o brzini ovisne, karakteristike krutosti. Ako su ugrađeni klizni ležajevi, krutost pri radnoj brzini bit će različita od krutosti u stacionarnom stanju. Pri kritičnoj brzini amplituda vibracija raste do razine određene sa stupnjem prigušenja. Nedostatak prigušenja ponekad može biti potencijalni uzročnik loma pa se kritične brzine moraju preći brzo.

Strojevi s većim brojem okretaja mogu preći i do tri kritična oblika na istom vratilu. [15]

Na sljedećoj slici [Slika 14.] je vidljivo kako se kašnjenje faze (fazni pomak) na rotirajućem vratilu ili osovini pomiče za 180 stupnjeva dok ide iz zone krutosti (kontrolirana krutost) u fleksibilnu zonu (kontrolirana inercija). Vratilo se pomiče iz rotacije oko svoje osi ograničene ležajevima u rotaciju oko centra svoje mase. Time se najviša točka (*high spot*) pomiče za 180 stupnjeva.

Vratilo koje radi znatno iznad svoje kritične brzine poznato je pod nazivom fleksibilni rotor⁵ (omogućuje izrazito savijanje tijekom rada) jer preuzima otklon prema položaju glavnih ravnina rezidualne neravnoteže. [15]



Slika 14. Fazni pomak na rotirajućoj osovini ili vratilu [15]

Tako je redom na slici :

- kruti način rada - vratilo rotira oko svoje geometrijske osi;
- brzina se povećava - pojavljuje se fazni pomak između heavy spot-a i high spot-a;
- pri rezonanciji - heavy spot je 90 stupnjeva iza high spota, sustav je nestabilan;
- fleksibilni način rada - vratilo rotira oko težišta svoje mase.

Kako bi osigurali da *high speed* rotor radi s minimalnim otklonom vratila (odnosno ekscentričnošću) proces balansiranja mora biti izrazito temeljit.

⁵ Rotor se smatra fleksibilnim kada radi blizu ili iznad vlastite frekvencije (kritična brzina), pravilo je smatrati rotor fleksibilnim kada radi pri 70 % prve kritične brzine ili brže.

Rotor 5-stupnjevane centrifugalne pumpe bio bi balansiran ovako [15]:

- a) vratilo bi se izbalansiralo s tolerancijom prema sebi;
- b) svaki pojedinačni impeler⁶ treba se izbalansirati s tolerancijom;
- c) prvi impeler treba biti postavljen na vratilo i taj sklop treba ponovno izbalansirati, s korekcijama namještanja impelera;
- d) drugi impeler bi se postavio i sklop bi se tada ponovno izbalansirao, s korekcijama na drugom impeleru
- e) postupak se ponavlja pet puta dok se svi impeleri ne postave;
- f) na potpuno sklopljenom i izbalansiranom rotoru provodi se korekcija u slučaju statičke neravnoteže jednako uz dužinu te u slučaju dinamičke neravnoteže na krajnjim rotorima.

Rezultat bi trebao biti rotor koji radi izrazito glatko s minimalnim otklonima. Rotor koji je balansiran na ovaj način omogućuje da vratilo prođe kritičnu brzinu s neznatnim povećanjem vibracija.

⁶ Radno kolo s lopaticama.

4. PRIMJENA MJERENJA VIBRACIJA ZA PRAĆENJE STANJA

Ključna točka u održavanju postrojenja je utvrđivanje potrebe za popravkom prije nego li se pojave kvarovi sa svim troškovima koje nose sa sobom. Bitno je zapamtiti da održavanje nije samo popravljavanje stvari nego adekvatan menadžment opreme za vrijeme njenog životnoga vijeka.

Utvrdjivanje potrebe za održavanjem provodi se s jednom ili više metoda [17]:

- od uočenih promjena promatranog stanja ili performansi - provjera stanja;
- skretanjem pozornosti na sebe - efektivno korektivno održavanje;
- rutinskim ili periodičnim pregledima - planirano preventivno održavanje;
- iz izmjerene promjene stanja ili performansi - održavanje po stanju.

Ti procesi pridonose većoj mjeri pouzdanosti postrojenja kada se u održavanju primjene u kombinaciji s vještinama preciznosti.

Glavni fokus ovog poglavlja je primjena mjerenja vibracija u praćenju stanja. Korektivno održavanje i preventivno održavanje su esencijalni dio svakog programa održavanja i ovdje se neće detaljno razmatrati.

4.1. Provjera stanja

Provjera stanja (condition checking) je procedura s ogromnim potencijalom, ali se često zanemaruje ili se ne prepoznaju mogućnosti koje nudi.

Rukovodilac postrojenja, koristeći se nekim osnovnim instrumentima koji mu pomažu u prepoznavanju grešaka, pregledava i prijavljuje ono što vidi, čuje ili osjeća prolazeći kroz postrojenje. Upravitelj postrojenja je prva kontaktna osoba osoblja praćenja stanja. U postrojenjima gdje je ta uloga službeno priznata i gdje se od te osobe očekuju povratne informacije te se nakon toga djeluje, dakle, u takvim se postrojenjima može vidjeti značajan porast pouzdanosti sustava. [17]

Treba obratiti pažnju na tri esencijalna elementa:

- uloga je službeno priznata, što uključuje i adekvatnu izobrazbu,
- savjet ili povratna informacija se očekuje i postoji postupak za to,

- informacija se prima na znanje i prema njoj se djeluje.

Provjera stanja neće biti učinkovita metoda ukoliko je vođenje postrojenja loše, ako postrojenje nije čisto i uredno.

Kod pristupa održavanju kao što je TPM (*Total Productive Maintenance*), rukovoditelj održavanja postrojenja i održavatelji su formirani u grupe, a rukovoditelj je treniran i od njega se očekuje da obavlja osnovne rutine preventivnog održavanja i pregleda uz potporu osoblja održavanja. Ovaj koncept timskog rada se pokazao kao vrlo učinkovit kada su svi gore navedeni elementi na svom mjestu. TPM danas ima značajnu ulogu pri ocjenjivanju poduzeća i jedan je od glavnih koncepata koji se uzimaju u obzir pri odlučivanju o izvrsnosti poduzeća. [17]

4.2. Održavanje po stanju

Osnovni principi održavanja po stanju su [17]:

- mjerenje i analiza vibracija;
- analiza stanja ulja i istrošenosti;
- termografija;
- kontrola bez razaranja (NDT - *Non Destructive Testing*);
- učinak, npr. kod mjerenja protoka.

U postrojenjima u kojima se praćenje stanja analizom vibracija rutinski provodi, obično se koristi termografija i analiza ulja. Do nedavno, rezultate svih mjerenja bilo je teško povezati i staviti u kombinirano izvješće. To se mijenja sa sve većim naglasnom na "integrirano praćenje stanja", gdje alarmo staje koje je proizašlo iz jedne metode daje razlog da se pronađu dokazi o kvaru s drugim metodama. Kvalitetnija prognoza preostalog životnog vijeka je rezultat integriranih programa.

4.3. Mjerenje vibracija

Mjerenje i analiza vibracija je dugi niz godina bila najpopularnija tehnika za praćenje stanja postrojenja jer [17]:

- učinkovito je pri detektiranju širokog pojasa defekata stojeva;
- otkrivanje kvara je dovoljno rano kako bi se mogle poduzeti korektivne mjere;
- kao dijagnostičko sredstvo može se koristiti za identificiranje specifičnih kvarova strojeva;
- tehnika je u suštini nerazarajuća i može se obavljati dok je postrojenje u pogonu;
- mogu se primijeniti različiti stupnjevi sofisticiranosti instrumenata i tehnike;
- relativno niska cijena pretvornika čini ovakvu instalaciju za praćenje stanja atraktivnom;
- u jednostavnim uvjetima 20 % troškova instrumentacije i vještina može se iskoristiti za otkrivanje 80 % mogućih kvarova;
- brzo se primjenjuje za *in-situ* balansiranje.

4.4. Praćenje stanja vibracija sustava

Danas većina sustava za praćenje stanja obuhvaća [17]:

- sonde - prenosive ili ugrađene;
- instrument za prikupljanje podataka (data kolektor);
- data kolektor firmware (softver koji je ugrađen u hardverski uređaj).

Softver je dostupan u različitim stupnjevima sofisticiranosti i različitom cjenovnom rang. Izbor sustava ovisi o kompleksnosti strojeva koji se testiraju, o vještinama rukovodioca i stupnju rizika na koji smo spremni. Ti faktori su relevantni ne samo rukovodiocima održavanja unutar poduzeća već i ugovornim održavateljima.

Postoji bezbroj jednostavnih ručnih instrumenata za testiranje vibracija i/ili ležajeva. Takvima je mjesto unutar programa testiranja, ali za potrebe praćenja stanja imaju ograničenu vrijednost jer je potrebno ručno spremanje podataka.

4.4.1. Sonda

Svi data kolektori dolaze s prenosivom sondom (akcelerometar) povezan sa spiralnim kabelom. Montiraju se magnetom, uvijanjem ili ljepljenjem, a mogu se i ručno držati iako to nije preporučljivo. Zbog sigurnosti ili pristupačnosti, sonde se trajno pričvršćuju na strojeve s

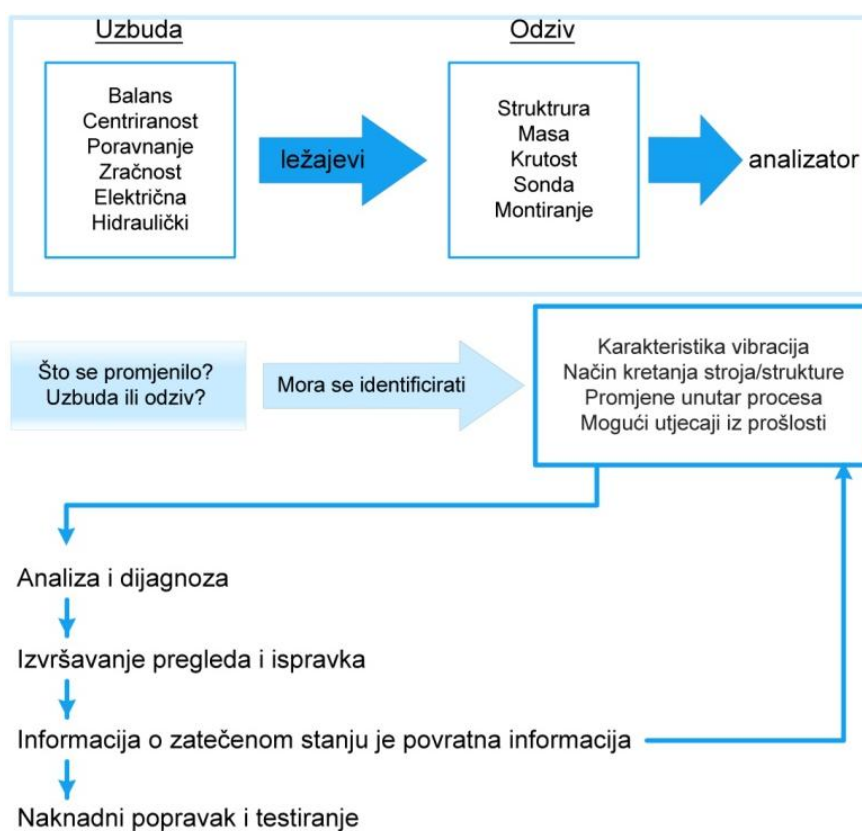
kabelom koji vodi do mjesta priključenja. Industrijska norma kaže da se trebaju koristiti akcelerometri s integriranim pojačalom (ICP - *Integrated Circuit Piezoelectric*) izlazne osjetljivosti od 100 mV/g. Kod posebne primjene, kao što su strojevi koji rade pri manjem broju okretaja, bit će potrebna sonda drugih karakteristika. [17]

Montiranje sonde je najslabija karika cijelog sustava mjerenja. Ako je sonda loše montirana, ni najsofisticiraniji i najskuplji uređaj data kolektora i softvera ništa ne znače.

Praćenje stanja ovisi o minimiziranju grešaka u ponovljivosti prikupljenih podataka i potreban je veliki trud kako bi se to postiglo.

Slušanje nemodificiranih vibracija preko slušalica omogućuje inženjeru da identificira kada postoji neprikladno montirana sonda, oštećeni kabel ili konektor. To je godinama standardna procedura, no, nažalost, većina proizvođača data kolektora nisu prihvatili ovaj koncept.

Za shvaćanje problema neizvjesnosti pri primjećivanju promjene najbolje je razmotriti sljedeći dijagram [Slika 15.].



Slika 15. Problem neizvjesnosti pri primjećivanju promjene [17]

4.4.2. Data kolektor

Data kolektori su tzv. 'magične električne kutije' koje su sposobne izvesti većinu trikova za koje su 80-tih godina bili potrebni poprilično veliki električni instrumenti.

Najjednostavniji data kolektor će samo prikupljati širokopojasne ili ukupne mjerne vrijednosti, za niže frekvencije mehaničkog stanja (vibracijska brzina) i više frekvencije stanja ležajeva (ubrzanje). Mogu biti izrazito učinkoviti za monitoring osnovnih strojeva gdje ne postoji veliki rizik. No treba imati na umu ograničenja širokopojasnog mjerenja. Te sofisticirane i često korištene 'kutije' će prikupiti širokopojasne vrijednosti, FFT podatke i vremenske valove, a uz sve to imaju i mogućnost ispitivanja ležaja. [17]

Ovi instrumenti imaju ICP opskrbu snage za akcelerometar, ugrađena pojačala kao i mogućnost napajanja stroboskopa i drugih dodataka. Većina njih ima i monitor za prikazivanje prikupljenih podataka. Imaju i mogućnost "massaging-a" podataka pa se u tom slučaju koriste više kao samostalni dijagnostički uređaji i analizatori.

Data kolektori se mogu smatrati analizatorima frekvencije, pružaju mogućnost prikupljanja i analiziranja vremenske i FFT domene s bilo koje sonde koja šalje dinamički signal, npr. tlak, buka, vibracija ili naprezanje. Također su sposobni prikupiti i pohraniti podatke sa sonde koje pužaju samo DC signal.

Obično imaju ugrađeni softver čime je uređaj lako nadogradiv. Za potrebe prikupljanja podataka instrument je programiran softverom za strojeve koji će se ispitivati i parametre mjerenja koje će se koristiti. [17]

4.4.3. Softver

U softveru se podešavaju parametri i zahtjevi za prikupljanje podataka kao i "massaging" prikupljenih podataka za analizu i izvješće. Većina sustava nudi različite razine sofisticiranosti i time povezano veću ili manju cijenu. Postoje različiti tipovi alarma i izvješća koji, ako se dobro postave i koriste, mogu služiti za dosadno brisanje i filtriranje podataka. Uz odgovarajuću osobu većina softverskih paketa može raditi s bilo kakvim data kolektorom.

4.5. Postavljanje sustava

Koraci koje treba razmotriti pri postavljanju sveobuhvatnog sustava za praćenje stanja vibracija su [17]:

- Odlučiti koji strojevi će se ispitivati.
- Identificirati proces pojave kvara koji će se promatrati i odabrati za to najprikladniji način praćenja stanja.
- Odlučiti lokaciju i plohe (horizontalna, vertikalna, pod kutem) koje će se koristiti.
- Odrediti parametre mjerenja vibracija koji će prikazivati podatke vezane za proces pojave kvarova - brzina ili ubrzanje, frekvencijski raspon, vrijeme prikupljanja podataka (broj prosjeka) zbog statističke pouzdanosti, proces pojave kvara (vidjeti hoće li biti udaran da se zna šta koristiti: vremensku domenu ili FFT, ili i jedno i drugo).
- Utvrditi u kojim će se uvjetima provesti mjerenje.
- Odlučiti o periodičnosti mjerenja. Period bi trebao bit manji od polovice vremena od defekta do kvara. Utvrđeno je da je kod većine industrija mjesečno ispitivanje dobar ritam. No postoje i slučajevi gdje je i kontinuirano praćenje stanja opravdano.
- Prikupiti podatke koji će pomoći pri dijagnosticiranju kvara - brzine vrtnje, prijenosni omjeri zupčanika i broj zubi, veličine remenica, broj i proizvođač ležaja, detalji o motoru, broj impelera i lopatica itd.
- Pripremiti strojeve za ispitivanje, omogućiti pristup točkama na kojima će se provodit ispitivanje, odlučiti o metodi montiranja.
- Uspostaviti postupak izvješćivanja kako bi se osiguralo da se iz ispitivanja izvedena informacija odgovarajući način rasporedi kako bi se moglo djelovati.
- Osigurati proces kontrole kvalitete - kako bi se osiguralo da će proces raditi ono što treba i kada treba. Treba postojati i odredba za ocjenu učinkovitosti.

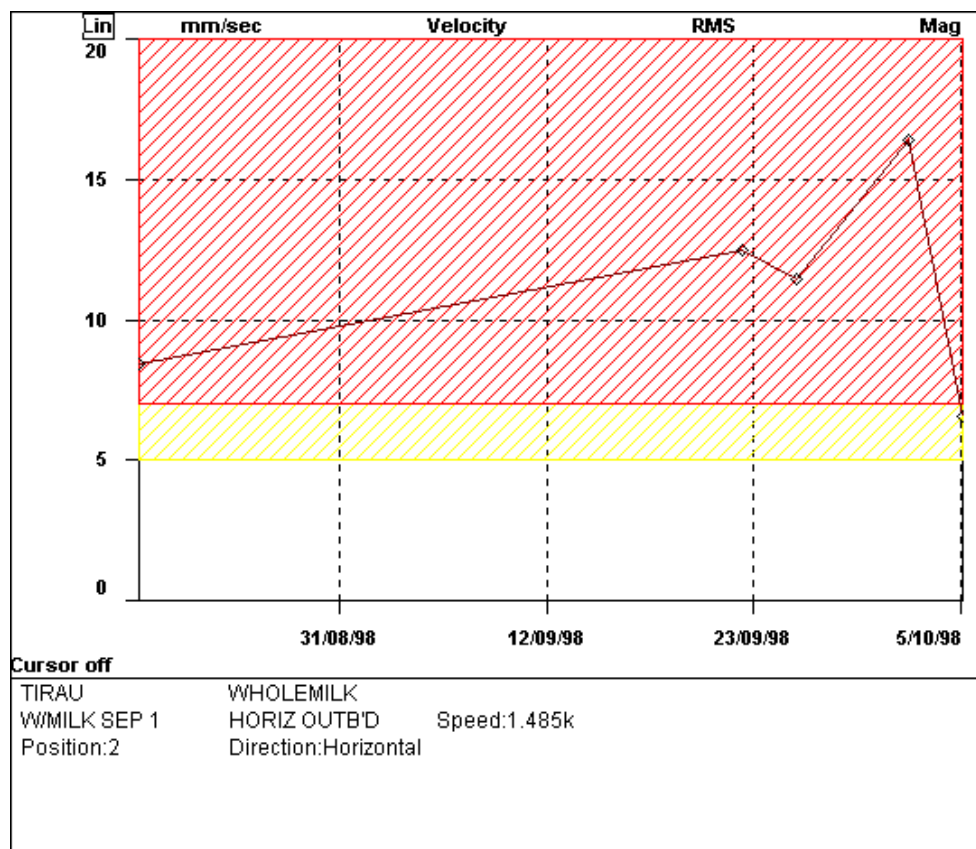
Sve ovo stvara dosta dodatnoga posla, ali potrebno je kako bi program radio učinkovito.

Sustav je postavljen na način da identificira probleme kada se pojave. Nažalost, neki problemi s vibracijama se ne manifestiraju na način na koji se očekuje pa može biti da parametri prikupljanja nisu prikladni za otkrivanje promjena. Zato je bitno naglasiti da je iskustvo izrazito bitan faktor. Možda je čak i bitnije reći da se treba razmotriti postavljanje parametara prikupljanja koji su sposobni detektirati promjene nego postavljati ih na način da daju dijagnostičke informacije.

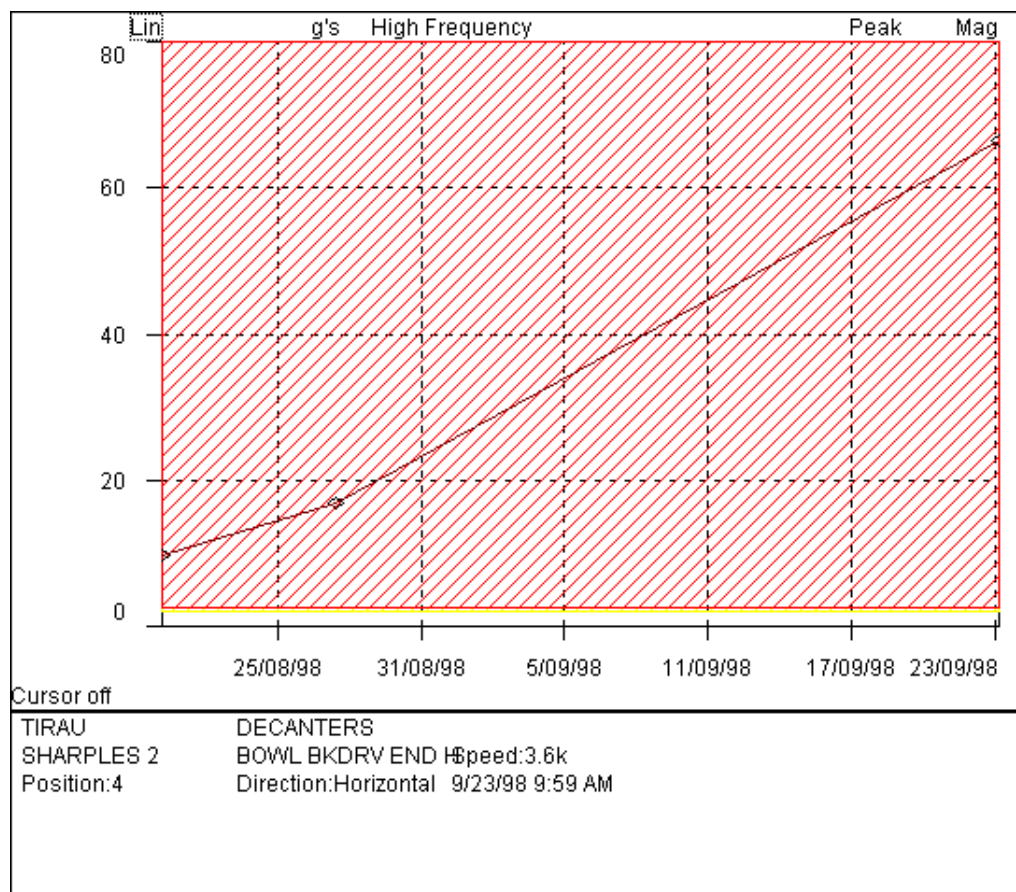
4.6. Prikaz podataka

4.6.1. Dijagram nagiba

Dijagram nagiba je najčešće korišten dijagram i u suštini predstavlja temelj za praćenje stanja. On predstavlja neki parametar izmjereno tijekom vremena [Slika 16., Slika 17.]. S vibracijskom brzinom to će biti ukupna vrijednost vibracija izmjerena između dva filtera, vjerojatno između 10 i 1000 Hz.



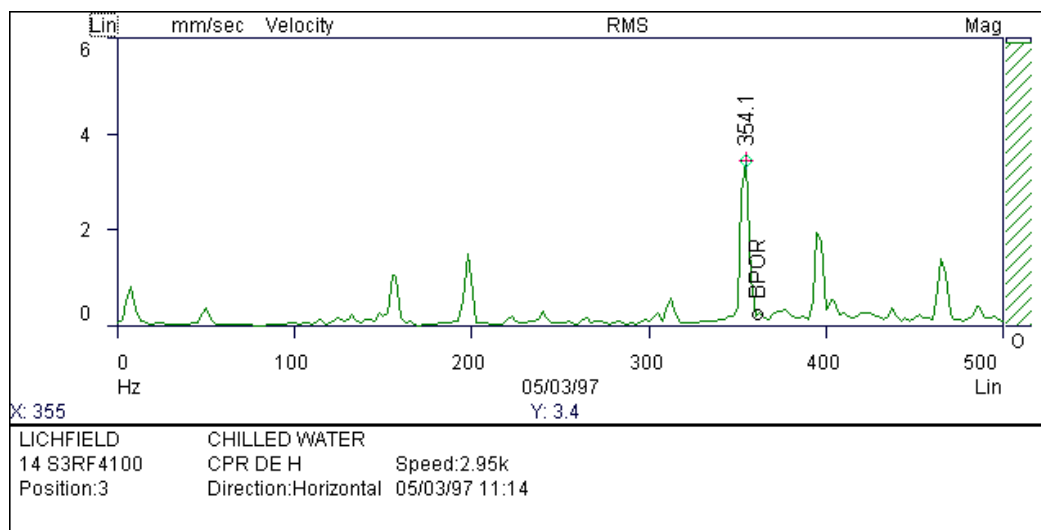
Slika 16. Dijagram nagiba [17]



Slika 17. Nagib parametra stanja ležaja (demodulirano ubrzanje) u vremenu [17]

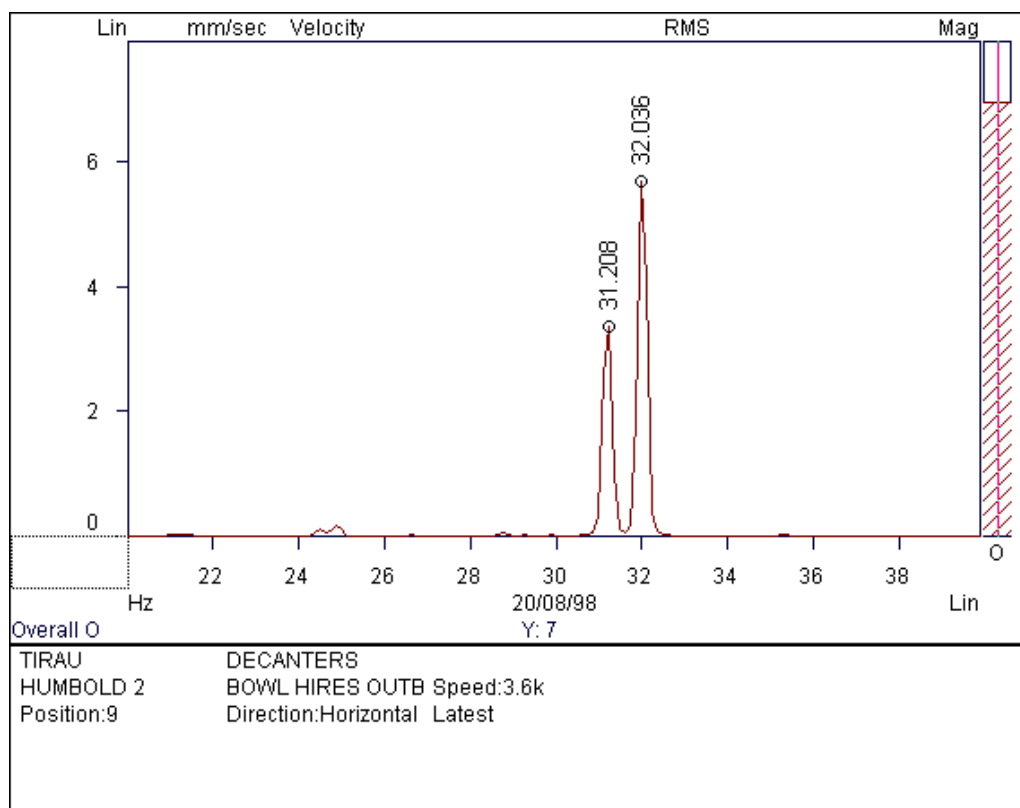
4.6.2. Dijagram spektra

Dijagram spektra se najčešće koristi u dijagnostičke svrhe i prikazuje niz vibracijskih frekvencija naspram jačine vibracija. Često je to raspon frekvencija od nule (ili blizu nule) do maksimalne vrijednosti. Različite računalne tehnike omogućuju "massaging" kako bi se prikazale relevantne informacije. Kvaliteta informacija u velikoj mjeri ovisi o broju linija, rezoluciji i F_{\max} . [17]



Slika 18. Dijagram spektra rashladnog vijčanog kompresora s rasponom frekvencija 0 - 500 Hz i 400 linija rezolucije [17]

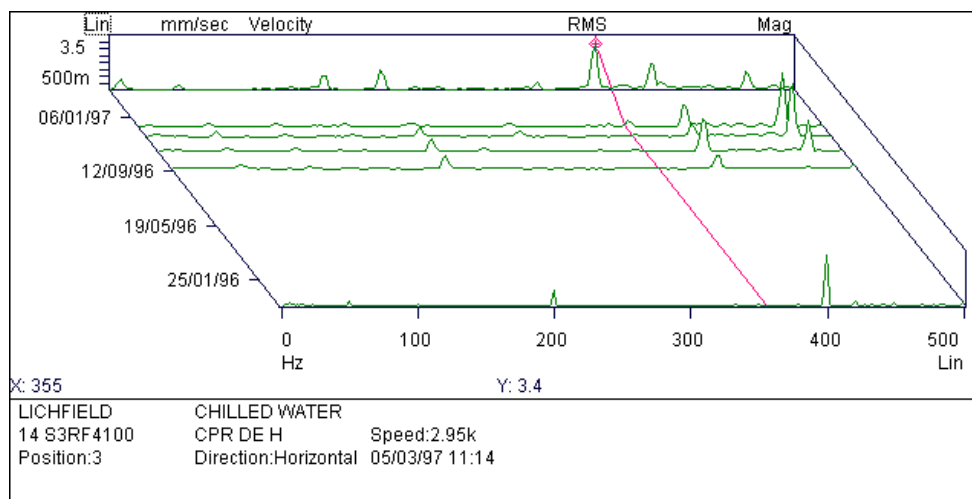
Uvećani spektar 20 – 40 Hz s 400 linija daje razlučivost od 0,05 Hz koja omogućava odvajanje dva vrha koja bi izgledala kao jedan s jakim impulsom što se vidi u gornjem spektru koji ima rezoluciju 1,25 Hz. [Slika 18., Slika 19.]



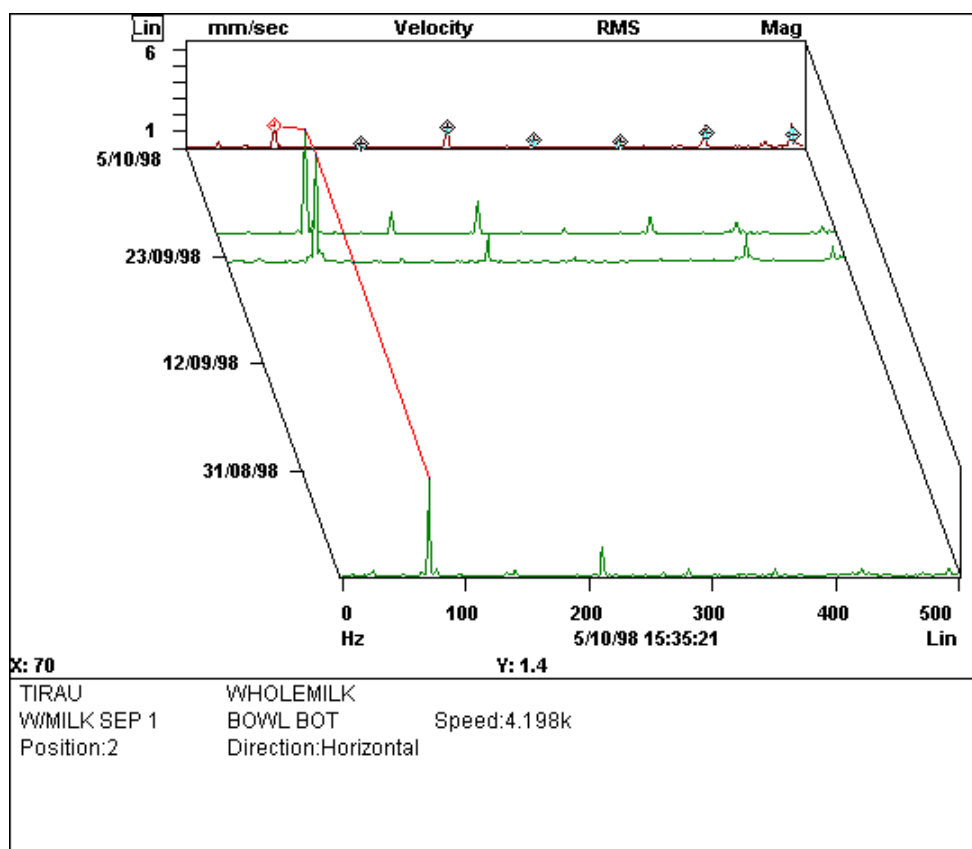
Slika 19. Uvećani spektar rashladnog vijčanog kompresora [17]

4.6.3. „Vodopad“ dijagram

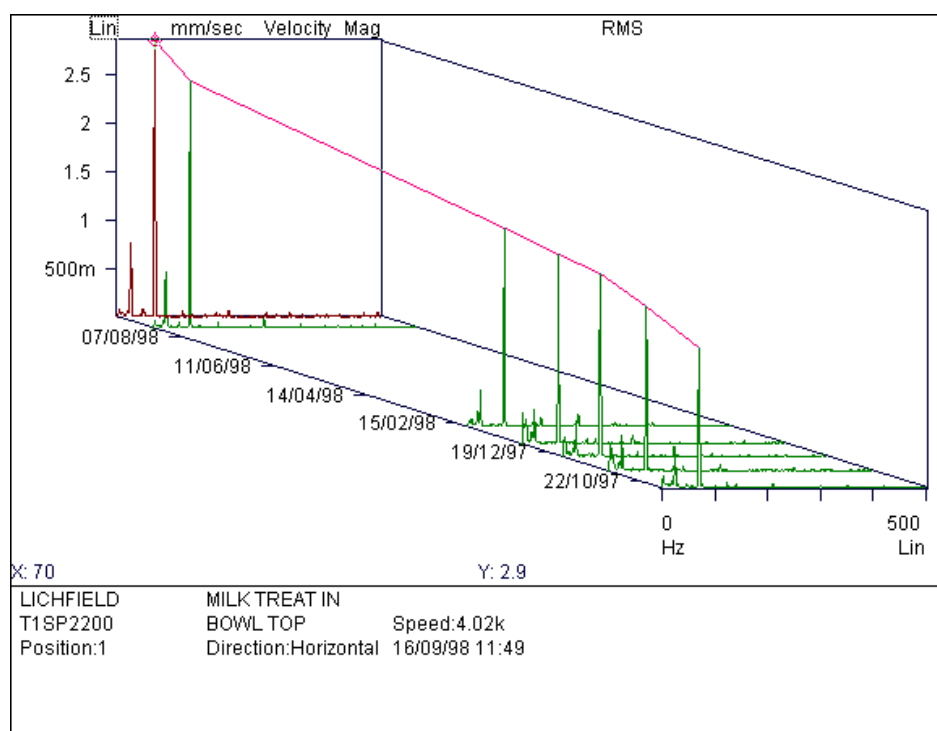
Primjeri ovih dijagrama nalaze se na sljedećim slikama [Slika 20., Slika 21., Slika 22., Slika 23].



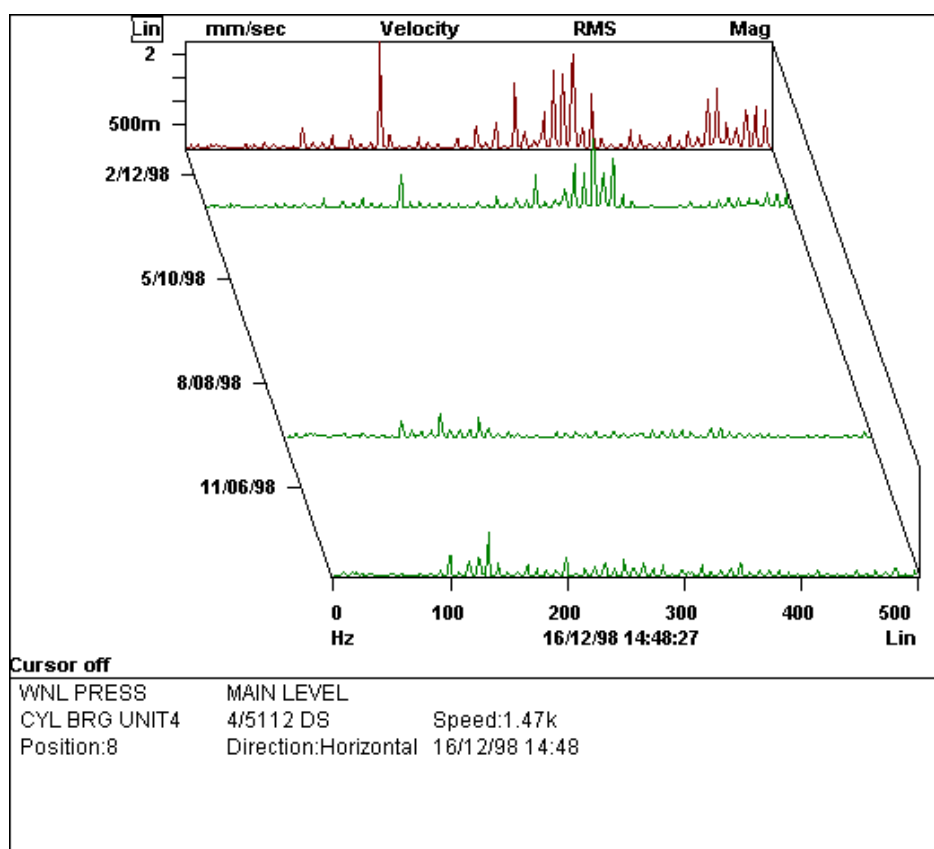
Slika 20. Signali razvoja oštećenja na ležaju u vijčanom rashladnom kompresoru [17]



Slika 21. Razvoj zračnosti potpore ležaja vertikalnog separatora kao rezultat prekomjerne neuravnoteženosti (nakon balansiranja zračnost ostaje) [17]



Slika 22. Zakrenuti „Vodopad“ dijagram kako bi se vidjela tendencija povećanja ozbiljnosti specifične frekvencije indicirajući pogoršanje debalansa kod vertikalnog separatora [17]



Slika 23. Prikaz promjene stanja cilindra za printanje na ofsetnom stroju za tisak [17]

4.7. Efektivno korištenje praćenja stanja vibracija

Jedna od glavnih i najočitijih prednosti praćenja stanja vibracija je otkrivanje početka kvara i temeljem toga mogućnost planiranja popravka ili zamjene s minimalnim prekidom proizvodnje. To je sustav za otkrivanje kvarova, kao i ostale preventivne tehnike. No, postoje druge prednosti iz podataka o vibracijama koje treba iskoristiti [17]:

- djelovanje nakon manjeg kvara u ranijoj fazi, npr. ispravljanje asimetričnosti prije nego li prouzrokuje prijevremeni kvar ležaja;
- korištenje dijagnostičkih informacija za lokalizaciju popravka neispravnih dijelova;
- korištenje dijagnostičkih podataka za "Root Cause"⁷ analizu i probleme s konstrukcijom;
- postizanje usklađenog rada stroja i dulje vrijeme između kvarova.

Porastom sofisticiranosti sustava raste i razina znanja i vještina potrebnih da bi se njime upravljalo te potreba za iskustvom pri dijagnostici na višim razinama. Jednostavni, na softverima bazirani, sustavi koji koriste samo širokopojasna mjerenja mogu biti relativno učinkoviti bez velike razine vještina, ali je od esencijalne važnosti osposobljavanje i dobro razumijevanje tehnologije. Osiguravanje i zadržavanje osoblja s adekvatnim vještinama jedan je od glavnih problema pri praćenju stanja vibracija u sklopu tvrtke, no to se donekle uravnoteži nekim drugim benefitima.

⁷ Danas se koristi u medicinskoj dijagnostici pri procjeni rizika tako što se pokušavaju sagledati svi potencijalni rizici od nastanka bolničke infekcije kako bi se na njih djelovalo.

5. DIJAGNOSTIKA KVARA STROJA ANALIZOM VIBRACIJA

5.1. Glavni uzroci kvarova na strojevima

Postoji bezbroj razloga kvarova strojeva. Neki nastaju zbog osobito agresivnih radnih sredina ili uvjeta rada. Međutim, većina se kvarova može pripisati ili ograničenjima konstrukcije stroja ili nepravilnom montažom, ugrađivanjem ili asimetričnosti. Dakle, mora postojati razlog za većinu kvarova.

Moglo bi se reći da je najčešći kvar, kvar na ležaju. *Ali, zašto se ležaj pokvario?* Možda je radio pri silama većim od dopuštenih (što proizlazi iz asimetričnosti ili neuravnoteženosti), možda zbog neadekvatnog podmazivanja ili je u ležaj ušla prašina...

Stoga je sve veći interes u primjeni *Root Cause* analize kvara. No, o tome će biti riječi nešto kasnije. Najprije treba ispitati dijagnostičke procese korištene za analizu podataka vibracija kako bi se pronašli uzroci prekomjernih vibracija, a time i potencijalnih razloga kvara stroja.

Neki od najčešćih kvarova iz rezultata istraživanja vibracija [18]:

- neravnoteža,
- asimetričnost,
- rezonancija,
- ležajevi,
- zračnost i ekscentričnost,
- problemi vezani uz protok,
- problemi s električkom,
- sustav zupčanika,
- savijanje osovine ili vratila.

Od navedenih kvarova četiri se pojavljuju u više od 90 % svih prijavljenih kvarova: debalans, asimetričnost, zračnost i kvar ležaja [18].

U ovom poglavlju detaljno će se razmotriti proces dijagnoze i analize naročito za gore navedena četiri najčešća razloga kvara većine rotacijskih strojeva.

Podaci o vibracijama koji se analiziraju proizlaze iz sila generiranih u stroju. Svaka sila ili kombinacija sila mora imati izvor koji se može identificirati. Zadatak analizatora je odrediti izvor tih sila te odlučiti predstavlja li rezultirajuća vibracija problem.

Kompliciranije stvari se rješavaju poslije toga, put od izvora sile koja izaziva vibraciju (npr. debalans) do točke gdje izmjerena vibracija ima određenu masu, prigušenje i krutost pa je rezultirajuća izmjerena vibracija modificirana tim karaketistikama. Dobar stručnjak analize vibracija mora znati odrediti dinamički odziv stroja i strukture koja se analizira, ukoliko želi da dijagnoza bude vjerodostojna. [18]

5.2. Bitne primjene analize vremenske domene

Dakle, vremenska domena je suma svih vremenskih komponenti izmjerenih sondom u određenoj točki mjerenja. Stoga se naziva kompleksna domena. Činjenica da je kompleksna upućuje na to da je nije jednostavno uspoređivati dijagramom trenda ili upoređivati rezultate različitih nadzora. Zbog toga nije lako dati nagib ili usporedbu jednog ispitivanja s dugim.

Generalno silama većim od 2 g bi trebalo posvetiti pozornost, odnosno trebala bi se provesti analiza. Vješt promatrač će u tome ponaći vitalne informacije određenih aplikacija kako slijedi [18]:

- primjena kod malih brzina (manje od 100 min^{-1});
- naznaka stvarne amplitude u situacijama gdje se pojavljuju impulsi, kao što je procjena ozbiljnosti defekta kotrljajućih elemenata ležaja;
- zupčanici;
- strojevi s kliznim ležajevima s x-y sondama (dvokanalna analiza sfere utjecaja);
- zračnost;
- trenje;
- impulsi;
- promjenjiva brzina opreme.

Vrsta proizvedenih podataka o vibracijama od gore navedenih sila koje djeluju u stroju, nije moguće u potpunosti prikazati u frekvencijskom spektru. Stoga je u svrhu dijagnoze, korisno pogledati izvorne podatke vremenske domene kako bi se shvatilo prirodno ponašanje vibracija.

5.3. Smjernice za izbor domene

Na sljedećoj tablici [Tablica 1.] se može vidjeti kada bi se trebalo promatrati frekvencijsku, faznu ili vremensku domenu za dobivanje najkvalitetnije dijagnostičke informacije.

Tablica 1. Primjena različitih domena ovisno kvarovima [18]

<i>Primjena/poblem</i>	<i>Spektar/FFT</i>	<i>Faza</i>	<i>Vremenska domena</i>
Neravnoteža	x	x	
Asimetričnost	x	x	
Rezonancija	x	x	x
Kotrljajući elementi ležaja	x		x
Klizni ležajevi	x	x	x
Zupčanici	x		x
Problemi s elektrikom	x		x
Zračnost	x	x	x
Problemi s protokom	x		
Izrazito niske frekvencije			x
Ciklička vibracija			x
Varirajuća brzina	x		x

Napomene [18]:

- Zbog nesigurnosti faznog pomaka u procesu integracije, ne bi se trebalo integrirati vremensko područje, a koristiti izvorne jedinice sonde (obično je to ubrzanje).
- Preklapanje prosjeka bi trebalo biti onemogućeno.
- Prozori koji su potrebni za FFT obradu mogu, kod nekih instrumenata, pokvariti podatke o vremenu. Trebalo bi se primijeniti uniforman ili pravokutni prozor.
- Za normalan *snap shot* vremenska domena koristi jedan posjek podataka. Ako se koristi više od jednog prosjeka, dobiveni rezultat bit će posljednji snimljeni uzorak i memorija će se nepotrebno zauzeti.
- Za prikupljanje podataka s dovoljnom rezolucijom treba koristiti 4 096 uzoraka (što će odgovarati 1 600 linija). Za izrazito velike frekvencije broj uzoraka će se morati smanjiti kako bi se postigao potrebni mali vremenski period.
- Dobiveni vremenski period bi trebao biti dovoljan za prikupljanje 6 – 10 ponavljanja promatranog slučaja ili ciklusa vrtila/osovine koja se promatra.
- Sinkronizirano vremensko uprosječavanje se može koristiti samo za pružanje podataka o vrtilu/osovini koja se promatra.

- Montiranje sonde - podaci ručno provedenih mjerenja se ne trebaju ni razmatrati za analizu vremenske domene.

5.4. Upute za postavljanje frekventne domene

Jedna od najbitnijih stvari pri postavljanju baze podataka je rezolucija frekventne domene. Veća rezolucija frekvencijske domene će osigurati potrebnu točnost frekvencijskih podataka, ali će isto tako i produžiti vrijeme obrade podataka. Dobar izbor, na modernim analizatorima strojeva, je rezolucija spektra 800 linija. Ukoliko se koristi frekvencijski pojas od 800 Hz, onda bi rezolucija frekvencijske analize trebala biti oko 1 Hz. Treba imati na umu da mora postojati mogućnost ispravka za Hanning prozor, netočnost koja nastaje u amplitudnoj domeni. [18]

Smjernice frekvencijskog pojasa osnovnih strojeva [18]:

- brzina – 20 puta brzine najbržeg vratila ukoliko se mjeri i spektar ubrzanja;
- brzina – 2 kHz ukoliko se ne mjeri spektar ubrzanja;
- ubrzanje – 50 puta brzine najbržeg vratila ili 3,2x veće od najviše frekvencije reduktora ili 2 kHz štogod od toga bilo veće.

5.5. Četiri glavna razloga nastajanja kvara

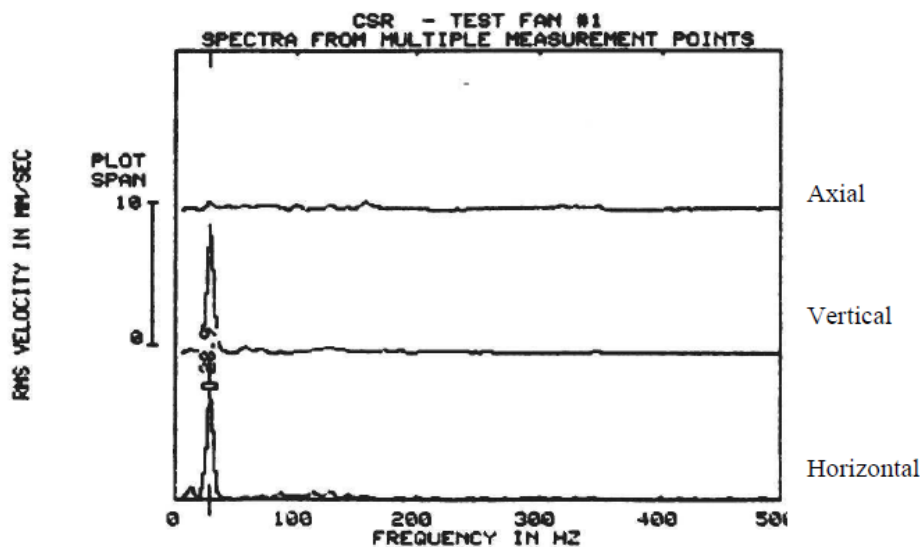
Tablica u kojoj su opisana četiri glavna razloga nastanka kvara iz priloga 2. nastala je kao rezultat dugogodišnjeg iskustva analize vibracija [18]. Nužno je imati na umu da karakteristike kvarova u ovoj tablici i u bilo kojoj dijagnostičkoj tablici nisu definitivne.

Karakteristike određenog defekta mogu značajno varirati ovisno o tipu stroja, brzini ili opterećenju. Dijagnoza mora biti utemeljena sa što više drugih verifikacijskih testova.

Detalji određenih metoda korištenih za analizu i otkrivanje kvarova ležaja ovdje neće biti razmatrani. Za to se koriste posebne tehnike mjerenja kako bi se dovoljno rano osiguralo otkrivanje kvarova prije nego rezultat tog kvara postane vidljiv vibracijom cijeloga stroja.

5.5.1. Neravnoteža

Na sljedećoj slici [Slika 24.] se nalazi dijagram na kojem je prikazan tipični troosni spektar neuravnoteženog stroja. Može se vidjeti da su vertikalna i horizontalna amplituda slične te da je aksijalna amplituda niska.

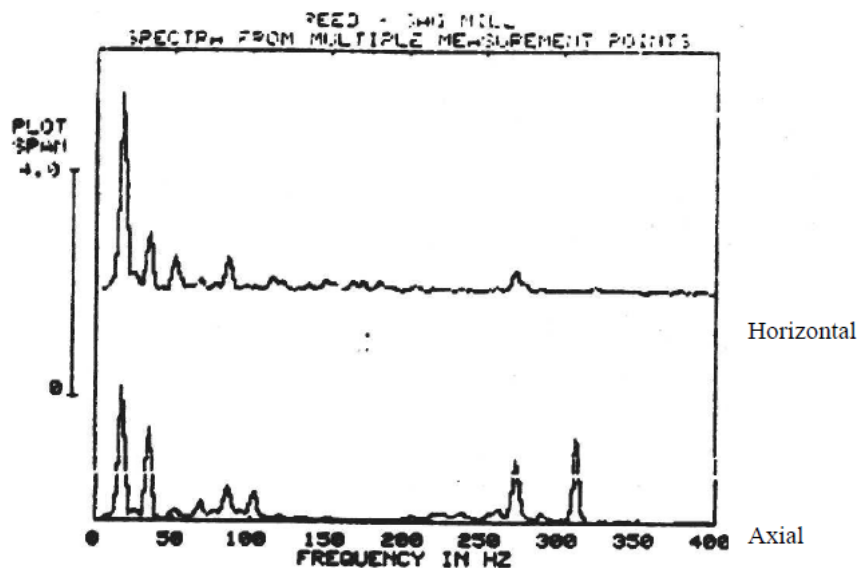


Slika 24. Tipični troosni spektar neuravnoteženog stroja [18]

5.5.2. Asimetričnost

Neki stručnjaci tvrde da je ovo greška koja se najčešće pronalazi. Prihvatljivost tolerancija za asimetričnost se ovdje neće razmatrati.

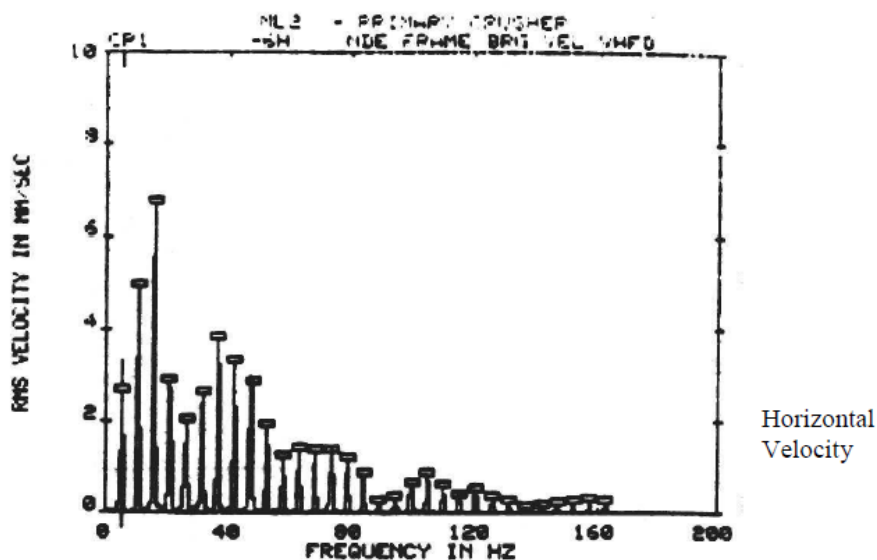
Donji dijagram [Slika 25.] pokazuje dva odziva nastala snimanjem ležaja stroja koji je postavljen uz spojku. Jedan je horizontalan, a drugi aksijalan. Mogu se uočiti različite harmonijske komponente u svakom smjeru koje se na temelju toga mogu povezati s informacijama glavnih grešaka strojeva prikazanih u *tablici četiri glavna razloga nastanka kvara iz priloga 2*.



Slika 25. Odzivi ležaja stroja [18]

5.5.3. Zračnost

Zračnost se može pojaviti u bilo kojem dijelu stroja i nije nužno povezana s vratilom/osovinom ili ležajevima. Primjerice, labavi pričvrtni vijak može proizvesti značajne zračnosti pri mjerenju na ležaju. Donji dijagram [Slika 26.] prikazuje tipični primjer spektra zračnosti.



Slika 26. Spektar zračnosti [18]

5.6. Napredne tehnike analize

U sljedećim točkama bit će opisane neke od naprednijih tehnika analize vibracija koje su dostupne.

5.6.1. Oblik otklona tijekom rada (ODS)

Svrha ove tehnike, ODS-a (*Operating Deflection Shape*), je prikaz usporenog snimka gibanja stroja ili strukture uz uvećane pomake u svrhu analize ili ispravka greške. [18]

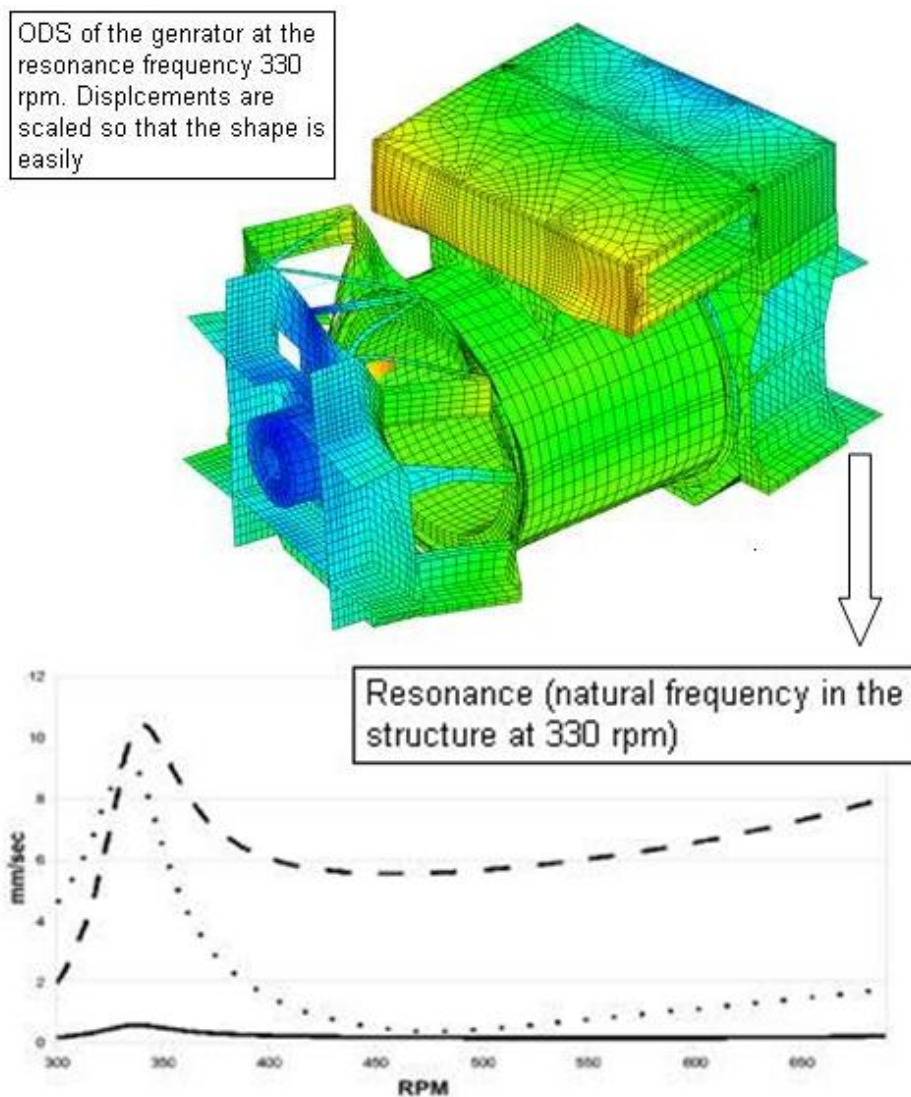
Obično se gibanje analizira pri jednoj odabranoj frekvenciji tako da je nužno imati podatke o fazi za svaku točku mjerenja. Podaci se mogu prikupiti na razne načine uključujući nabrojane [18]:

- *Jednokanalni analizator s faznom mogućnosti rada.* Mjerenja se uzimaju na potrebnim mjestima (dovoljno da se mogu napraviti prepoznatljive linije stroja). U svakoj točki mjerenja treba se koristiti ista fazna referenca. Podaci se nakon toga ručno unose u

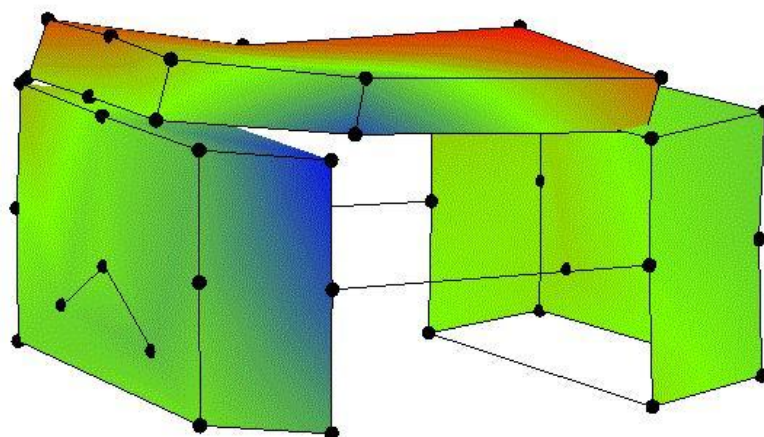
ODS softverski paket pri čemu se dobije prikaz rezultata. Krajnji rezultat je ograničen frekvencijom odabranom za mjerenja.

- *Dvokanalni analizator s mogućnošću funkcije transfera.* Mjerenja se provode jednom sondom na fiksnom mjestom koje reprezentira vibraciju stroja. Podaci se pohranjuju u analizator te se mogu skinuti i staviti u ODS softverski paket. Prednost ove metode je mogućnost analize bilo koje frekvencije unutar pojasa odabranog za mjerenje. Veze među fazama pri odabranim frekvencijama se automatski uspoređuju u procesu analize.
- *Višekanalni sustav za prikupljanje podataka.* Ponekad su podaci prolazni i mogu se snimiti samo u jednom slučaju. Za takve analize potrebno je snimiti sve podatke simultano i to se može odraditi digitalno ili korištenjem snimanja na kasetu. Kao u prethodnom slučaju, podaci se prenose na softver i odabiru se potrebne frekvencije za analizu.

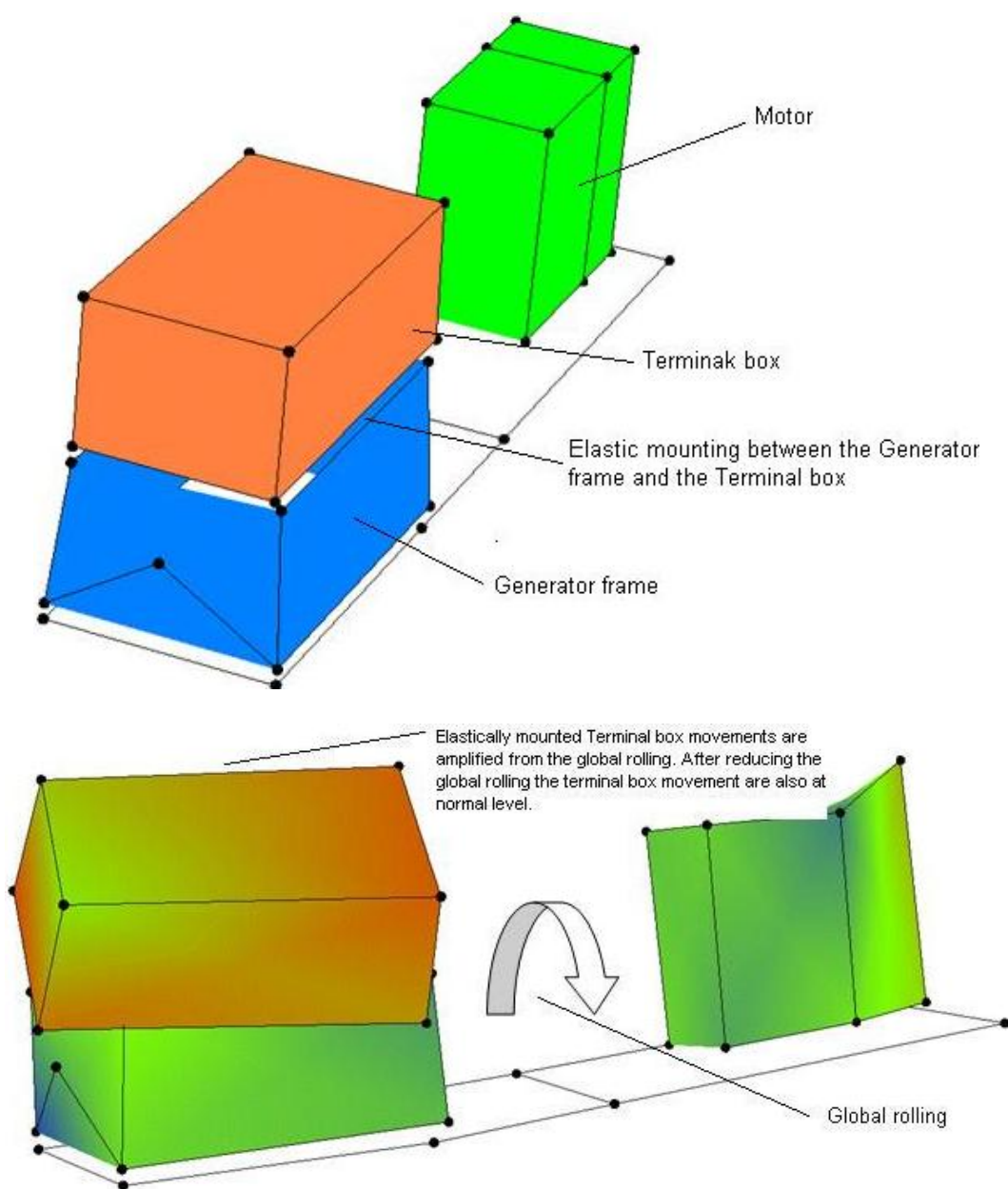
Tipični primjeri ODS prikaza nalaze se na donjim slikama [Slika 27., Slika 28., Slika 29.]. Podaci se uglavnom isporučuju na disku kako bi ih klijenti mogli pregledati u animiranom obliku na svom računalu.



Slika 27. Generirani model konačnih elemenata generatora i izračunati odzivi brzine u tri translacijska smjera vezano uz brzinu vrtnje rotora (RPM) [21]



Slika 28. Izmjereno vertikalno savijanje ODS-a okvira generatora na 35 Hz (oko 50 mjernih točaka, sve mjereno u tri translacijska smjera) [21]



Slika 29. Korištenje ODS analize - izvor problema se može suziti na globalno kotrljajuće kretanje [21]

5.6.2. Višekanalno prikupljanje podataka

Kao što je već rečeno, neki događaji su prolazni i moraju biti snimljeni u jednom slijedu radi kasnijih analiza. Ovo je često potrebno i u druge svrhe.

Na primjer, periodično praćenje stanja parnog turbogeneratorskog obuhvaćat će kontrolu pri zaustavljanju i moguće je da će trajati oko sat vremena od zatvaranja pare da bi dobili rad stroja pri malom broju okretaja. Takvi se podaci obično snimaju ili spajanjem *proximity probe*

sustava instaliranog na stroju ili postavljanjem seizmičke sonde na svakom ležaju. Rezultat se može spremati na disk. Tada puls koji se pojavljuje jednom po okretaju se također snima kako bi se pružila fazna referenca u svrhu analize. [18]

Digitalno pohranjivanje podataka postalo je sve popularnije jer je kompaktnije i pouzdanije. Frekvencijska ograničenja se redovno nameću zbog kompromisa između uzorkovanja i dostupnog mjesta za pohranu podataka. Primjerice, ako je podatak snimljen u 100 uzoraka u sekundi i mora se obraditi s FFT-om, bit će potrebno ugraditi niskopropusni filter na 50 Hz kako bi eliminirali preklapanje. [18]

5.6.3. Strukturna mjerenja

Studija amplitude vibracija i načina rada za velike strukture sadrži tehničke izazove, ali rezultati koji se postignu mogu biti od velike koristi.

Pomaci bi se pri niskim frekvencijama (npr. 0,1 Hz) trebali mjeriti jer je većina inženjera zainteresirana isključivo za podatak pomaka. Ukoliko se koriste akcelerometri onda će se birati uređaji velike osjetljivosti obično oko 500 mV/g. Ovo omogućava da se dovoljan izlaz pri niskim frekvencijama može integrirati dva puta da bi dobili pomak i postigli potrebno mjerenje s minimalnim šumom. [18]

ODS je dobra tehnika za strukturnu analizu i stoga će jedna od gore opisanih metoda biti potrebna za prikazivanje podataka u potrebnom formatu.

5.7. Posebni slučajevi

U ovom poglavlju se prolazi kroz dijagrame i dijagnostičke informacije koje će pomoći u dijagnozi kvarova specifičnih tipova strojeva (elektromotora, pumpi, ventilatora, reduktora, turbo-strojeva i stapnih strojeva).

5.7.1. Reduktori

Reduktori su sredstva za prijenos okretnog momenta i promjenu smjera ili brzine. To su izrazito kompleksni sklopovi i nije lako praćenje stanja ili dijagnostička analiza takvih uređaja.

Mrežasta frekvencija zupčanika (*Gear Mesh Frequency* - GMF) je najčešće promatrana vibracija, a stupanj do kojeg je zupčanik pohaban, asimetričan ili oštećen će odrediti jačinu harmonika u spektru.

Često je korisno načiniti nagib rasta harmoničkih amplituda posebno druge mreže (GMFx2) što je indikator zazora među zupčanicima (tako da nisu u kontaktu i ne prenose gibanje) i trošenja profila.

Ekscentričnost zupčanika ili osovina/vratila se identificira proučavanjem bočnih traka oko GMF-a i njegovih harmonika. Ova tehnika omogućuje identifikaciju određene osovine/vratila ili seta zupčanika koji stvara problem u kompleksnom reduktoru. [18]

Izrazito je korisno proučavati vremensku domenu u analizi zupčanika, pogotovo ako se sumnja na slomljeni zub zupčanika. Sinkrono vremensko uprosječavanje korištenjem taho pulsa na vratilu koje nosi zupčanik s kvarom uvelike povećava amplitudu kvara iznad generalne buke. [18]

Analiza vremenske domene je od esencijalne važnosti pri sporohodnim zupčanicima kao što su zupčasti mlinovi (koriste se u šećeranaama) i slično gdje se impuls kvara zuba pojavljuje tako rijetko da se može desiti da se ne snimi u vremenskim uzorcima za normalnu frekventnu analizu. [18]

Međusobna mreža frekvencija (*Mutual Mesh Frequency* - MMF) je vrijedna izračunavanja tamo gdje postoje dva defektna zuba u mreži zupčanika koji uzrokuju modulaciju amplitude impulsa kvara. Formula za računanje MMF-a je sljedeća [18]:

$$\text{MMF} = \frac{\text{BRZINA ZUPČANIKA 1}}{\text{LCM UPARIVANJE ZUBA ZUPČANIKA 2}} \quad (4)$$

Za monitoring ležaja u reduktorima potrebne su posebne tehnike od kojih je HFRD (*High Frequency Reference Design*) najjednostavnija. Vrlo je bitno moći identificirati frekvenciju kvara uz sve druge visoke frekvencije vibracija.

Pisani su brojni akademski članci i istraživanja o drugim tehnikama kao što su Hilbert transformacija i Cepstrum analiza, ali i mnoge druge. Nije nužno koristiti te tehnike ukoliko se HFRD odradi pažljivo. Analiza kvara reduktora se uglavnom dobro upotpunjuje analizom trošenja krhotina i pod uvjetom da je uzorkovanje dobro provedeno može pružiti potvrdu dijagnozi kvara otkrivenog vibracijskom analizom. [18]

5.7.2. Centrifugalni ventilatori

Sljedeće napomene se odnose posebno na centrifugalne ventilatore s kosim lopaticama uvijenim prema unutra. Greške koje se obično javljaju su: neravnoteža, asimetričnost, zračnost, neispravni ležajevi, iznenadna promjena protoka, rezonancija te nagnutost ležaja.

5.7.2.1. Iznenadna promjena protoka

Iznenadna promjena protoka stvara vibracije od 0,1 do 0,5 puta brzine osovine. Amplitude su nestabilne te se paralelne promjene zvuka ventilatora mogu čuti. [18]

5.7.2.2. Pojava rezonancije

Struktura. Strukturi ventilatora često nedostaje krutost. Rezonancija će proizvesti izrazito usmjerene vibracije. Potrebno je provjeriti fazu na ležajevima. Česta je aksijalna rezonancija potpore ležaja, što izaziva nedovoljnu krutost sklopova s ležajevima. Provjera "čekić testom". [18]

Osovina. Vlastita frekvencija osovine blizu radne frekvencije uzrokovat će vrtlog i vrlo veliku vibraciju osovine. Ventilatori promjenjivih brzina su vrlo skloni tom problemu. "In situ" balansiranje može smanjiti vibracije do prihvatljive razine. [18]

5.7.2.3. Nagnuti ležaj

Ispravno naljezanje unutarnjeg prstena ležaja bitno je za nesmetano funkcioniranje ventilatora zbog velikog aksijalnog potiska. Kombinacija aksijalnog potiska i klimanja unutarnjeg prstena ležaja ozbiljno će smanjiti životni vijek ležaja. [18]

5.7.2.4. Struganje

Struganje se obično vrlo dobro čuje. Vibracijski podaci će vrlo vjerojatno prikazivati rotacijske harmonike (x_1 , x_2 , x_3 , itd.) te "sub-orders-e" i "half-orders-e" ($x_{0,5}$, $x_{1,5}$, $x_{2,5}$, itd.). [18]

5.7.2.5. Neravnomjerno aerodinamičko opterećenje

Ekscentrični ili kolebljivi valjak može generirati unutarnje tlačne valove, obično na vratilu. Manje greške obično nisu značajne. [18]

5.7.2.6. Oštre prolazne vibracije

Vibracije generirane na osovini i lopaticama ventilatora uglavnom nisu problem osim ako postoje ili strukturne rezonancije ili rezonancije cijevi. Razonancije cijevi se mogu otkriti mjerenjem duljine ravnih područja cijevi i povezivanjem tih dimenzija s brzinom zvuka i četvrtinom, polovicom ili ukupnom dužinom reflektirajućeg vala. [18]

5.7.3. Dijagnostika klipnih strojeva

Mjerenje vibracija klipnih strojeva može biti korisno za indikaciju o stanju, no, postoje mnogi oblici kvarova koji se ne mogu vibracijama otkriti (bar ne na jednostavan način). Za sve rotirajuće strojeve izrazito je bitno periodično uzorkovanje i analiza ulja, a i termografija može biti korisna.

Kod klipnih motora mjerenje vibracija može biti od koristi za praćenje stanja ravnoteže i simetričnosti te nekih aspekata zračnosti. Kako god okrenemo, samo vibracija nije dovoljna za kvalitetno praćenje stanja. Puno je bolji pristup 'praćenje uspješnosti' kod motora i mjerenje parametara koji će dati indikaciju o gubitku kompresije, neispravnoj mlaznici, promjenama temperature itd.

Kod klipnih kompresora najčešći oblici kvarova su popuštanje ventila, trošenje, gubitak kompresije zbog trošenja prstena, slabo brtvljenje i slično. Neke od ovih grešaka se mogu uočiti u podacima vibracijske frekvencije, ali ukoliko je mjerenje pažljivo provedeno mogu se uočiti i u vremenskoj domeni. [18]

5.7.4. Turbo strojevi

Brzohodni turbo strojevi su generalno vrlo pouzdani i održavanje je obično potrebno samo zbog trošenja brtvi, oštećenje lopatica i slično. Većina kvarova vezani su za ležajeve i za rješavanje je potrebna promjena u konstrukciji. Vrtloženje ulja i zračnost ležaja se može rekonstruirati i ti se problemi vrlo vjerojatno više neće pojavljivati.

Direktno mjerenje pozicije vratila pomoću *proximity probe* sustava prikupljanja podataka pruža puno bolje mogućnosti dijagnoze. Većina data kolektora i analizatora mogu napraviti jednokanalne Bodeove ili Nyquistove dijagrame koji predstavljaju različite načine prikazivanja vektora amplituda/faze dok stroj radi.

Analiza orbite (dva kanala + faza) je najčešće primjenjivana gdje oblik orbite daje informacije o simetričnosti, ravnoteži, struganju i slično.

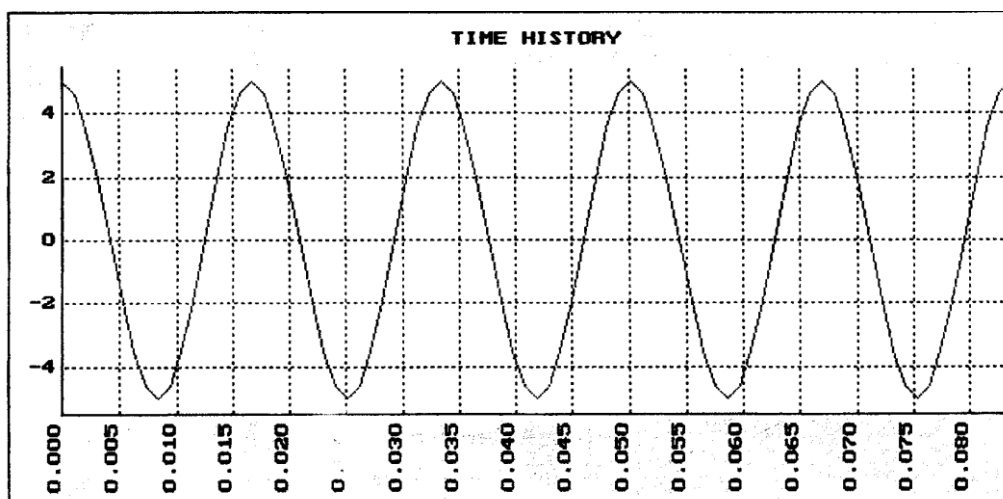
Povezivanje vratila se obično radi preko zupčanika. Oni su čest izvor problema zbog slabog aksijalnog pomaka. Istrošenje zuba ili spoja često će biti vidljivo pažljivim pregledom. Zamjena je jedini način popravka. [18]

5.8. Razumijevanje oblika valova u vremenskoj domeni

Osnovi elementi oblika valova vremenske domene su [18]:

- sinusoidalni valovi i njihov zbroj;
- simetrija mjerila amplitude i skraćenje;
- simetrija vremenskog mjerila;
- odnosi faza u vremenskom mjerilu;
- prolazni ili impulsni signali;

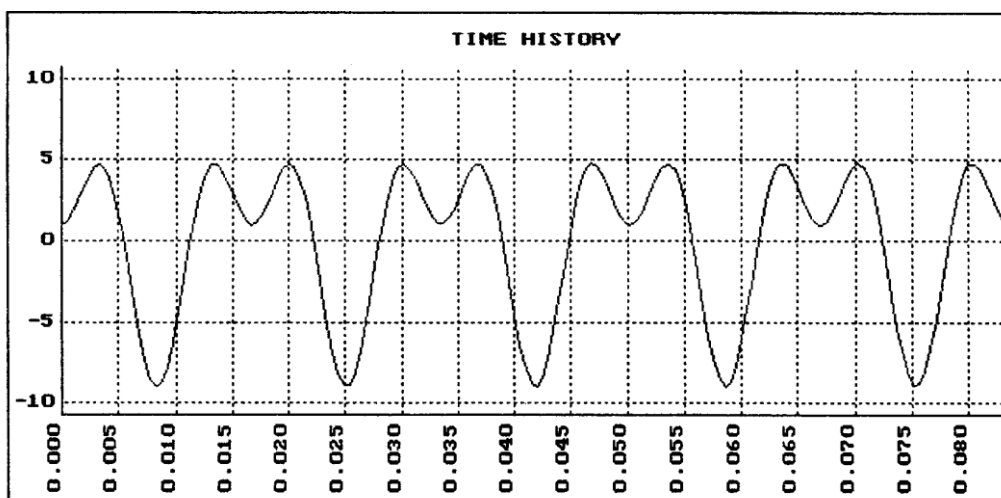
5.8.1. Sinusoidalni valovi



Slika 30. Čisti sinusni val [18]

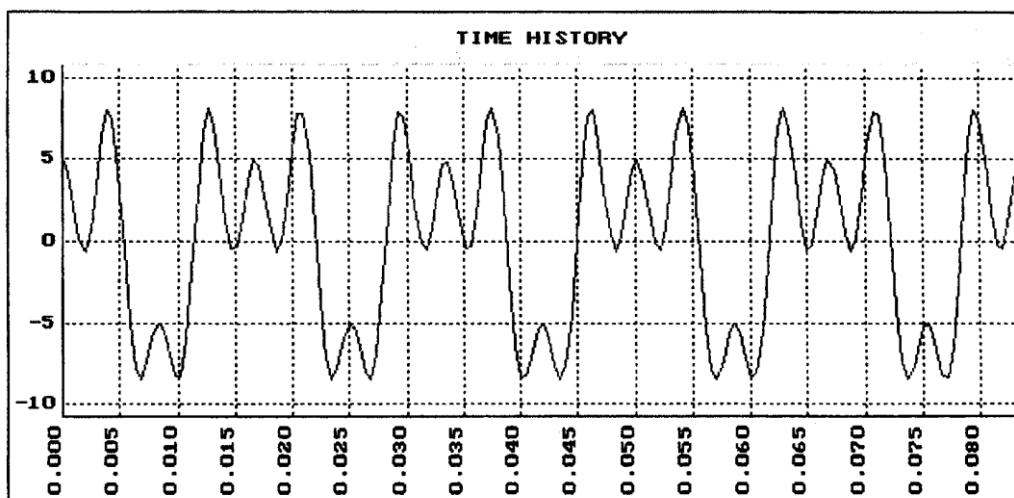
Gornji valni oblik [Slika 30.] prikazuje čisti sinusni val perioda 0,0168 s i amplitude 5 jedinica. Primjer bi mogao biti od nekog stroja koji rotira pri 3585 min^{-1} .

Valni oblik na slici ispod [Slika 31.] je rezultat dodavanja još jednog harmonika, $2 \times \text{min}^{-1}$ - oduzima se od osnovne frekvencije u pozitivnom dijelu i dodaje na osnovni dio negativnog dijela. Može se zamijetiti promjena simetrije u vertikalnom smjeru.



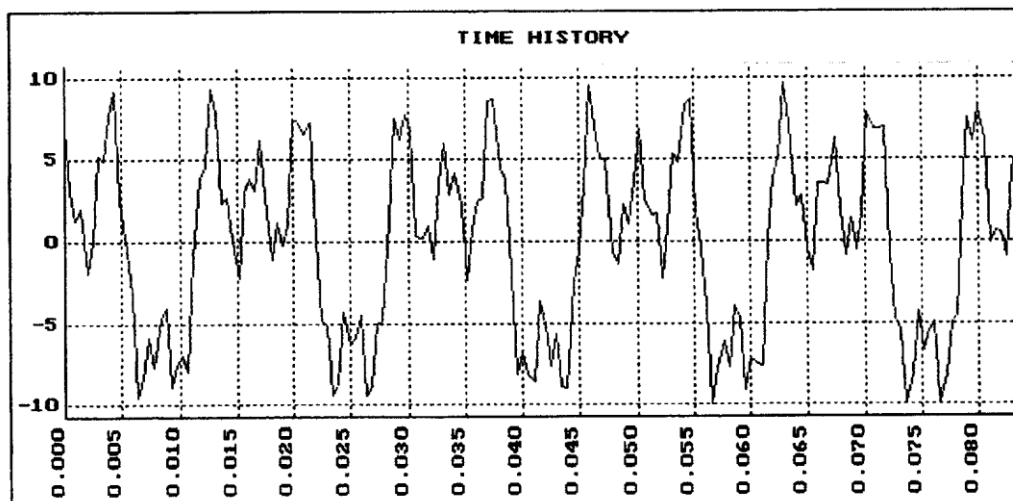
Slika 31. Valni oblik nastao dodavanjem drugog harmonika ($2 \times \text{min}^{-1}$) [18]

Dodavanjem četvrtog harmonika ($4 \times \text{min}^{-1}$) dobiti ćemo val na sljedećoj slici [Slika 32.].



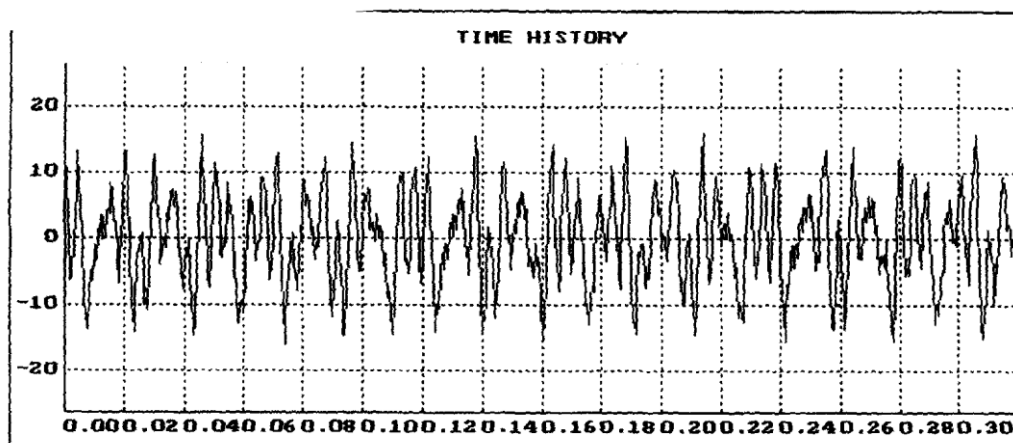
Slika 32. Valni oblik nastao dodavanjem četvrtog harmonika ($4 \times \text{min}^{-1}$) [18]

Zatim, neka komponenta visoke frekvencije koja predstavlja frekvenciju ležaja povećava kompleksnost valnog oblika [Slika 33.].



Slika 33. Val nastao dodavanjem komponente visoke frekvencije [18]

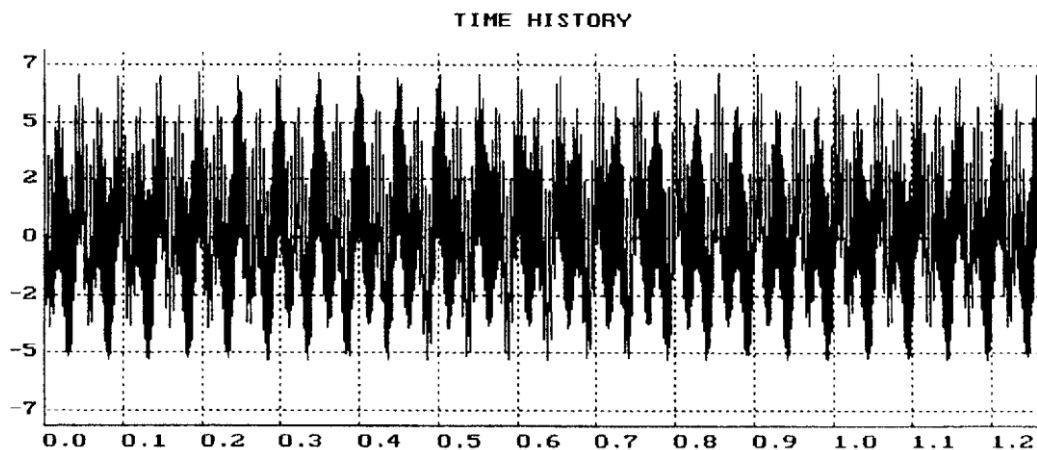
Konačno, dodavanjem neke vrlo visoke frekvencije koja predstavlja mrežu zupčanika se dobiva tipični valni oblik [Slika 34.].



Slika 34. Val nastao dodavanjem vrlo visoke frekvencije - tipični valni oblik [18]

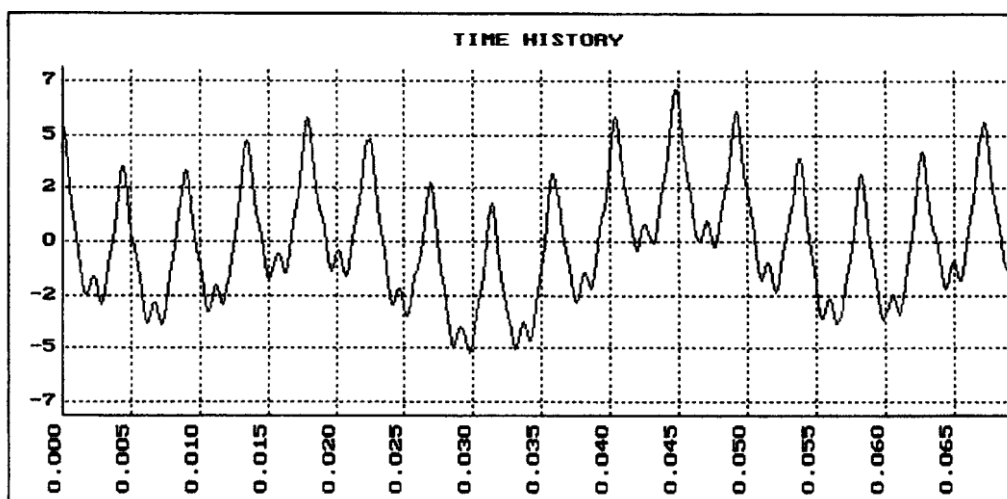
5.8.2. Važnost rezolucije i vremenskog mjerila

Budući da se većina mjerenja izvodi akcelerometrima koji su osjetljivi na visoke frekvencije, mala je vjerojatnost da će se u stvarnom svijetu vidjeti puno valnih oblika sinusnog karaktera. Valni oblik, vremenskog raspona 1,2 s, prikazan dolje [Slika 35.] tipičan je primjer. Val ne izgleda sinusoidalno i ne čini se osobito informativnim. [18]



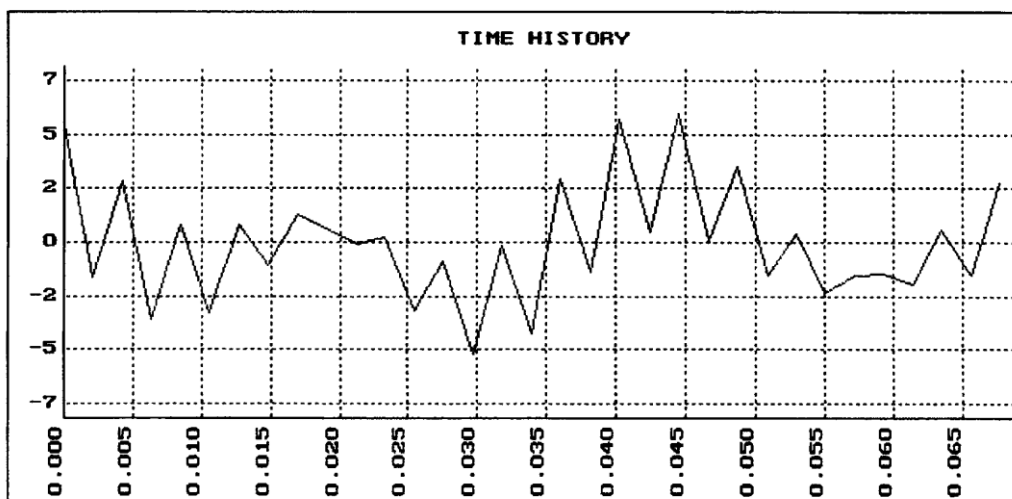
Slika 35. Valni oblik vremenskog raspona 1,2 s [18]

Međutim, uvećavanjem na manji vremenski raspon isti blok podataka se čini puno informativnijim [Slika 36.]. Zapravo, sadrži pet međusobno zbrojenih sinusnih valova.



Slika 36. Uvećani valni oblik sa slike 35. [18]

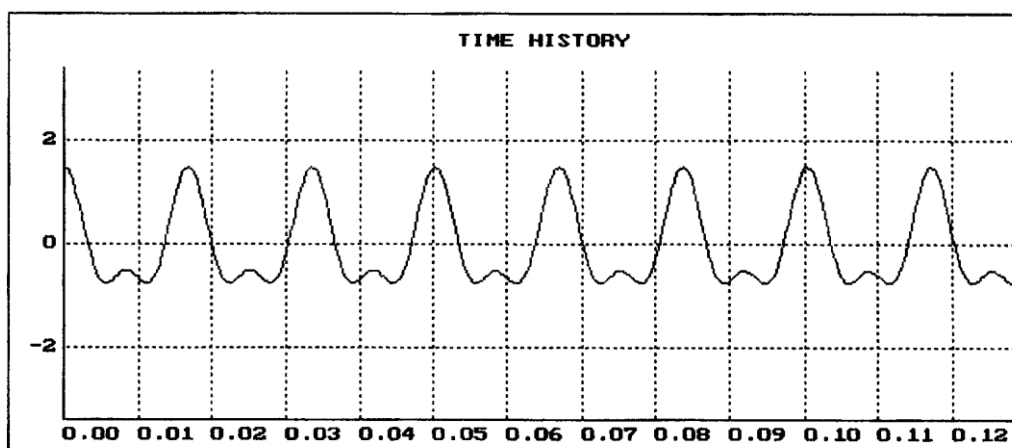
Gornji oblik [Slika 36.] vidljiv je samo ako je korišten dovoljan broj linija rezolucije. Donji val [Slika 37.] predstavlja iste podatke s nedovoljnom razlučivošću.



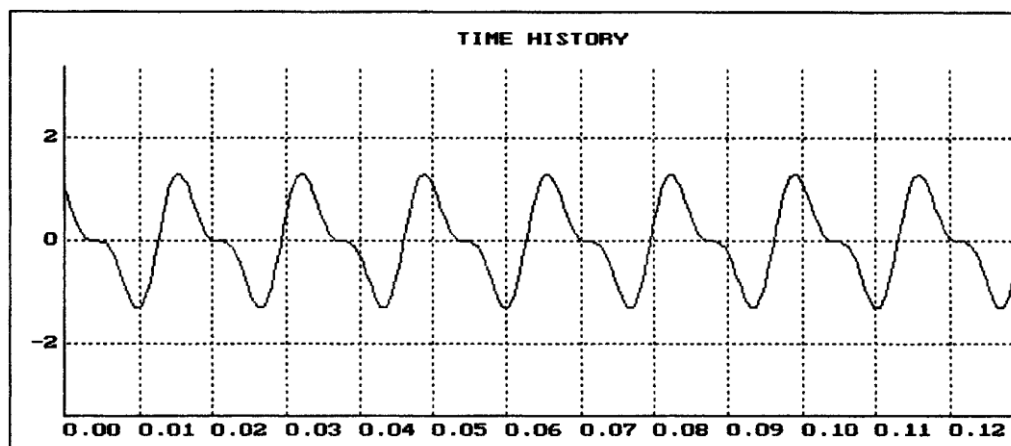
Slika 37. Prikaz valnog oblika pri nedovoljnoj rezoluciji [18]

5.8.3. Utjecaji fazne promjene na zbrajanje sinusoidalnih valova

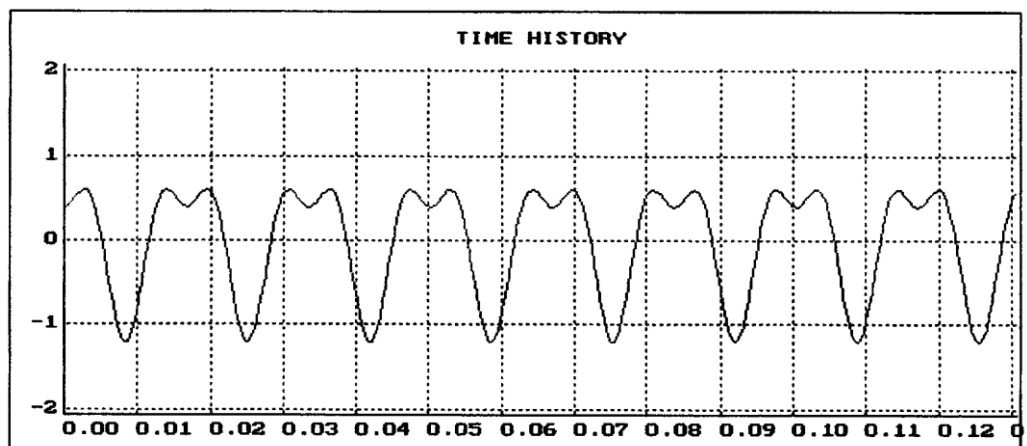
Dolje prikazani valni oblik [Slika 38.] sastoji se od $1 \times \text{min}^{-1}$ i $2 \times \text{min}^{-1}$ s faznom razlikom od 0° .

Slika 38. Valni oblik s faznom razlikom od 0° [18]

Na sljedećoj slici [Slika 39.] $2 \times \text{min}^{-1}$ je pomaknut za 90° u odnosu na $1 \times \text{min}^{-1}$.

Slika 39. Pomak za 90° [18]

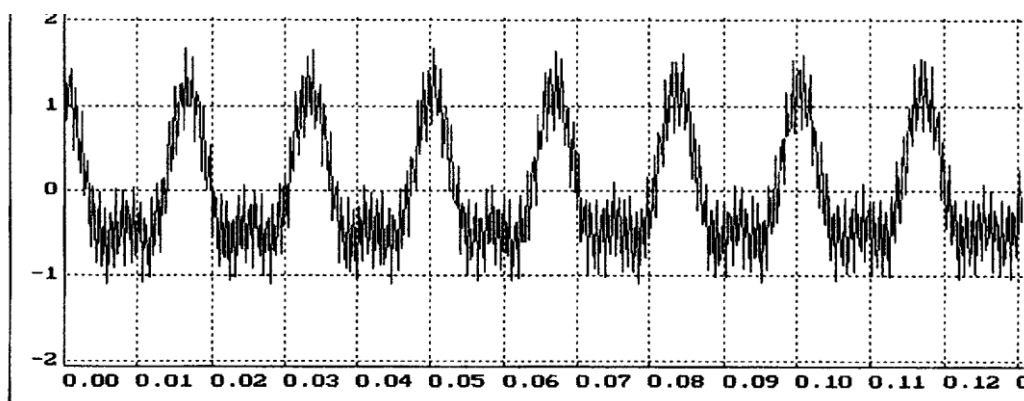
Promjenom faznog odnosa na 180° dobivamo novi oblik prikazan dolje [Slika 40.].

Slika 40. Pomak za 180° [18]

5.8.4. Simetrija amplitudnog mjerila i skraćenje

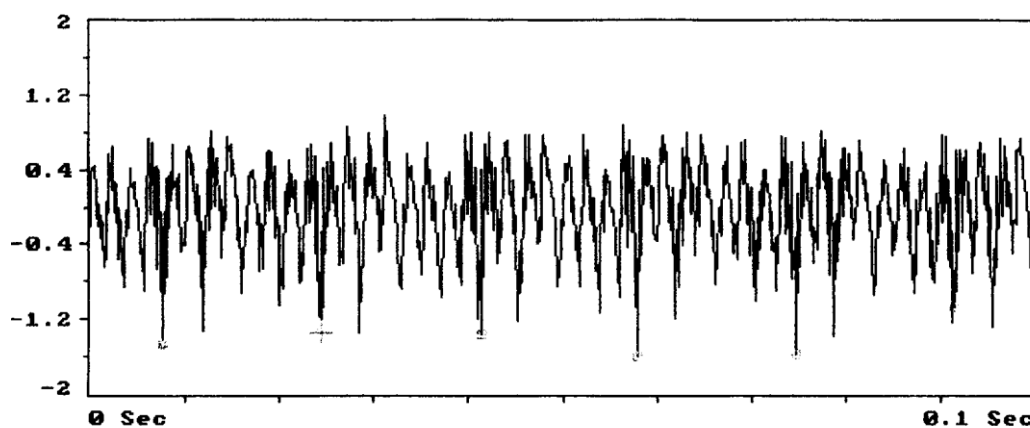
Na gornjem se dijagramu [Slika 40.] može primijetiti promjena simetrije amplitude. Skraćenje signala se može pojaviti zbog preopterećenja ulaza uređaja i uzrokovati "izrezivanja" što je često vidljivo kao čisto skraćenje. Uzorak koji je prikazan gore je nastao kao posljedica asimetričnosti, što je jedna od najčešćih uzroka kvara.

Zatim, uzorak prikazan dolje [Slika 41.] je sličan, ali obrnut i sadrži neke komponente visokih frekvencija, što ga čini tipičnijim za signal akcelerometra nastao asimetričnošću kućišta ležaja. [18]



Slika 41. Signal akcelerometra nastao asimetričnošću kućišta ležaja [18]

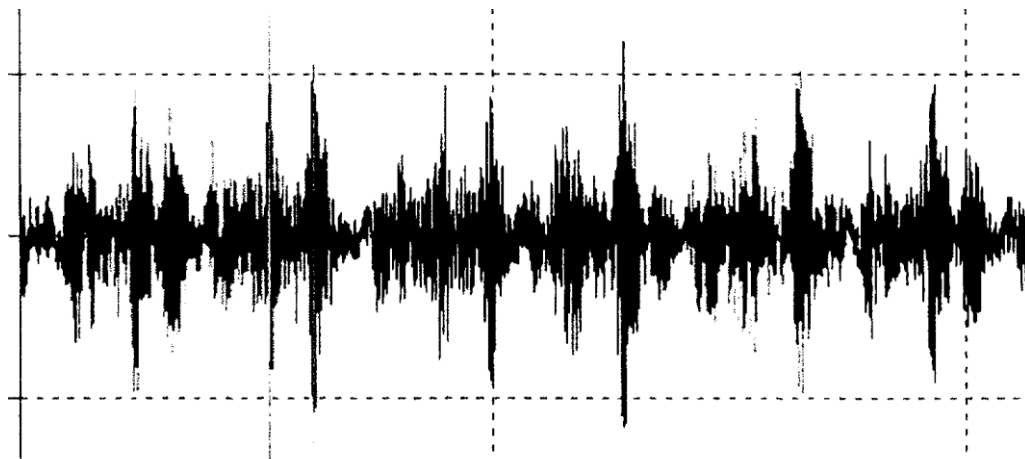
Sljedeća slika [Slika 42.] prikazuje signal stvarne asimetričnosti stroja pri čemu se može uočiti amplitudna simetrija i oznaka brzine stroja.



Slika 42. Signal stvarne asimetričnosti stroja [18]

5.8.5. Simetrija vremenskog mjerila

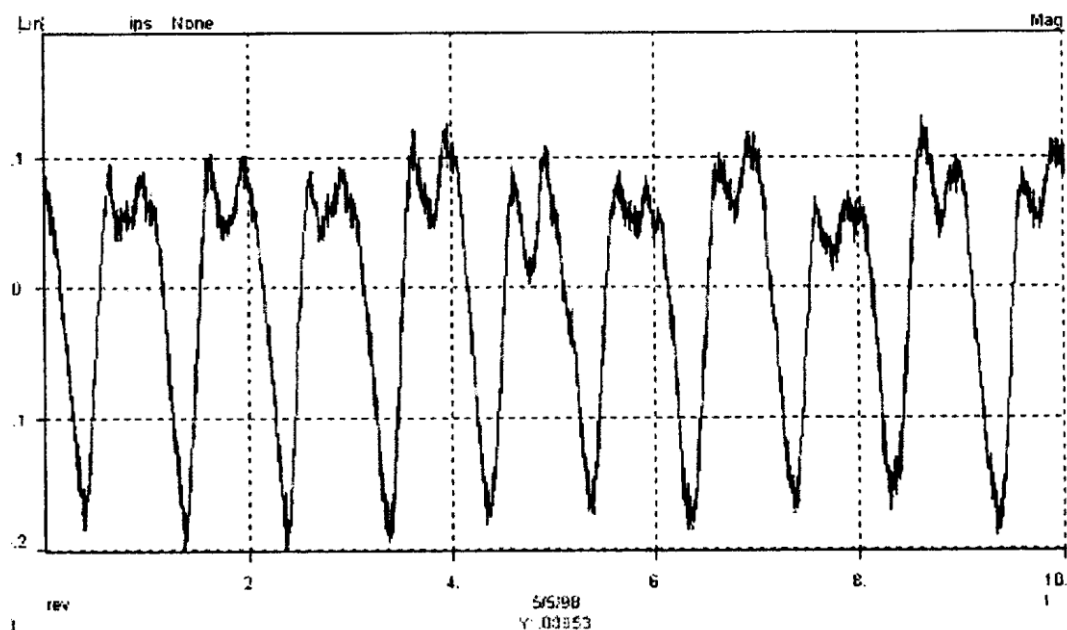
Dolje prikazani signal [Slika 43.] je uzrok kvara ležaja, i prikazuje seriju ponavljajućih impulsa s varirajućom amplitudom od oko 10 g. FFT ovog signala bi otkrio amplitudu vjerojatno manju od 1 g. [18]



Slika 43. Serija ponavljajućih impulsa [18]

5.8.6. Sinkroni i nesinkroni valni oblici

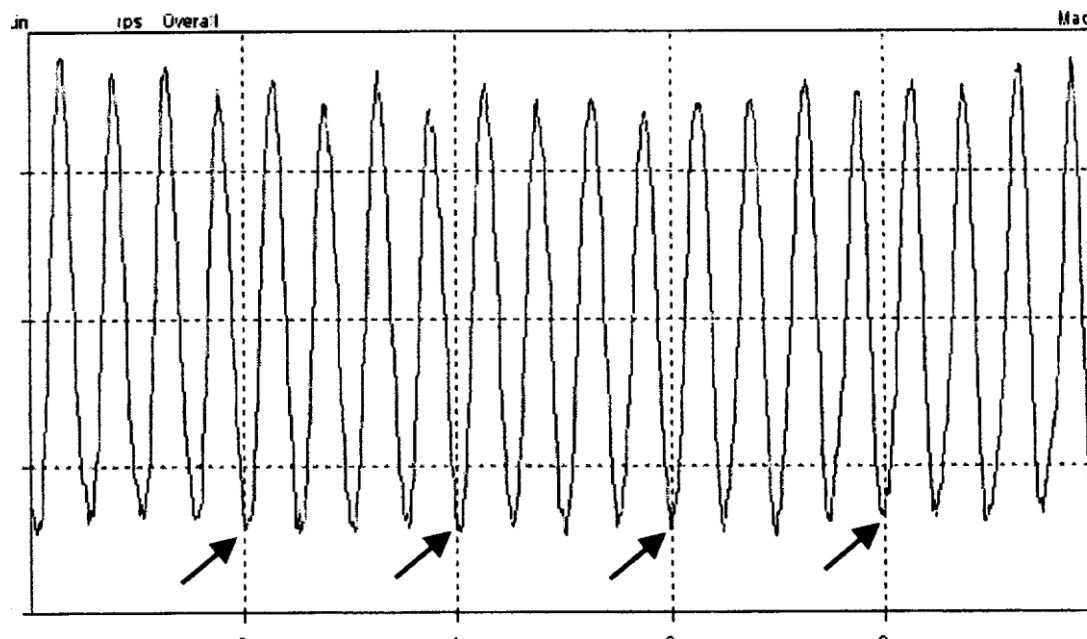
Instrumenti koji nude 1 x oznake okretaja u minuti, ili mrežu, nude i izrazitu prednost pri određivanju sinkronosti izvora vibracija. U dolje prikazanom valnom obliku [Slika 44.] horizontalna os je u min^{-1} i vrhovi se pojavljuju u istoj točki u svakom novom ciklusu. To pokazuje da su vibracije sinkrone s okretajima u minuti vratila. [18]



Slika 44. Sinkroni valni oblik [18]

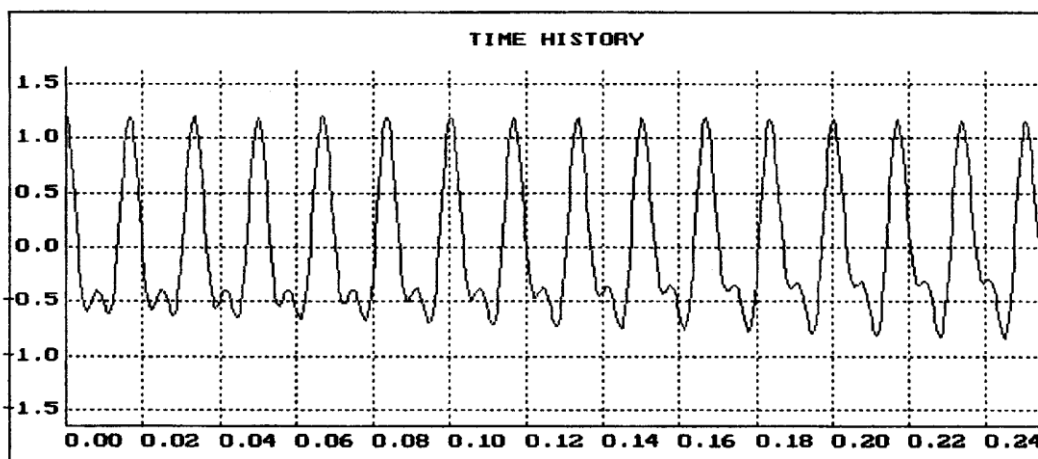
Sljedeći valni oblik [Slika 45.] prikazuje dvopolni motor s dominantnom vibracijom pri $2 \times \text{min}^{-1}$. Bliži pregled otkriva suptilne promjene pozicije valnog oblika vremena u odnosu na

oznake okretaja u minuti. Izvor ove vibracije je zapravo električno zujanje pri čemu se vide vrlo niske razine 1 x i 2 x okretaja u minuti mehaničke vibracije.



Slika 45. Valni oblik dvopolnog motora [18]

Gornji valni oblik pokazuje nižu amplitudu, ali veći frekvencijski signal koji 'jaše' na višoj amplitudi i nižem frekvencijskom signalu. Napredovanjem ciklusa komponente više frekvencije se pomiču uzrokujući postepene promjene na uzorku [Slika 46.].



Slika 46. Pomicanje komponenti više frekvencije [18]

6. IZOLACIJA VIBRACIJA

6.1. Primjena

Svaki inženjer s znanjima ili odgovornostima u području vibracija bit će prije ili kasnije tražen za savjet vezan uz problem izolacija vibracija. Iako se principi izolacije vibracija relativno jednostavno mogu shvatiti, praktična primjena traži vještine na području dizajna i dobro razumijevanje izvora vibracije ili vibracija.

Problemi s izolacijom vibracija mogu se podijeliti u dvije grupe. U prvu grupu problema spada potreba za smanjenjem prijenosa vibracija sa stroja na strukturu koja ga nosi. Na primjer, izolacija motora u motornom vozilu, izolacija mehaničkih sredstava opreme (ventilatori, klima uređaji) u bolnicama i poslovnim zgradama, izolacija bučnih cijevi od zidanih konstrukcija. Takve primjene se obično rješavaju vrlo jednostavno s lako dostupnim izolacijskim proizvodima. Druga skupina je suprotno gore navedenom - potreba da se smanji prijenos vibracija s nosive strukture na stroj ili neku drugu opremu. Općenito ovi se problemi rješavaju puno teže zbog relativno niskih frekvencija izvora vibracija koje nalazimo u nosivim strukturama. Na primjer, izolacija kabine vozača na strojevima za zemljane radove, izolacija preciznog instrumenta (mikroskopa) od uobičajenih vibracija zgrade, izolacija osjetljive električne opreme od prekomjernih vibracija konstrukcije (strojevi za prosijavanje) i izolacija motornog vozila od hrapave površine ceste.

Postoji i treća skupina, no nju je bolje razmatrati zasebno kao minimizacija vibracija ili prigušenje umjesto izolacije vibracija.

6.2. Pomak i vlastita frekvencija

Osnovno pravilo izbora izolacijskog sredstva glasi: *Vlastita frekvencija sustava koji se izolira proporcionalna je a linearnim otklonom tog sustava dok je u neopterećenom stanju* [19].

Postoji niz uvjeta i ograničenja pri primjeni gore navedenog pravila. Samo pravilo proizlazi iz jednadžbe koja definira vlastitu frekvenciju sustava masa - opruga s jednim stupnjem slobode gibanja [19]:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (5)$$

Uz pretpostavku da je za određeni sustav masa konstantna, tada je f_n proporcionalan korijenu konstante krutosti ili obrnuto proporcionalan korijenu progiba.

Na *dijagramu učinkovitosti izolacije iz priloga 1.* se može primijetiti da ordinata prikazuje vlastitu frekvenciju i statički progib. Vlastita frekvencija za sustav sa statičkim progibom od 100 mm je cca. 1,5 Hz, dok je sustav sa statičkim otklonom od 25 mm cca. 3 Hz. Omjer korijena progiba je 2:1, frekvencija je obrnuto proporcionalna.

6.3. Praktične primjene odabira i projektiranja izolacije od vibracija

6.3.1. Smanjenje prijenosa sila sa stroja na njegovu nosivu konstrukciju

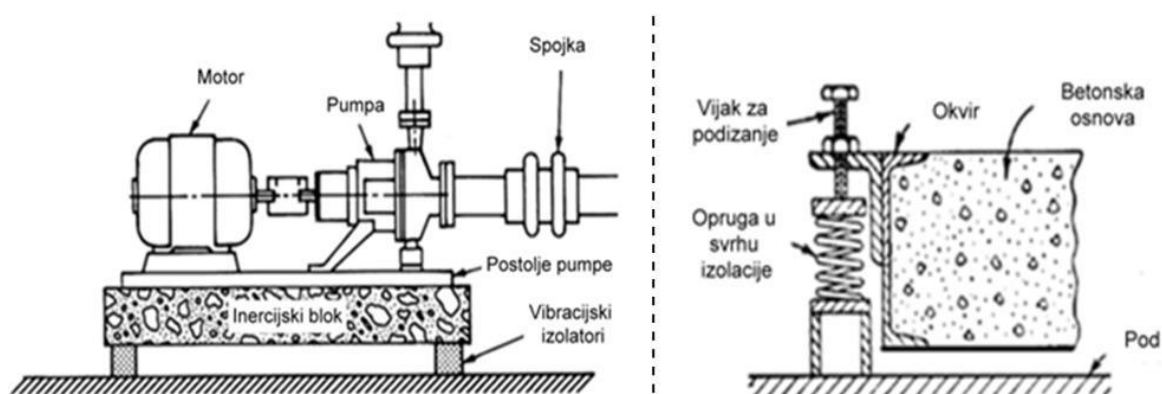
Polazna točka je određivanje najniže frekvencije sile stroja. Obično se to određuje prema najmanjoj brzini vrtnje nekog vratila stroja zbog potencijalnog rezidualnog debalansa te komponente. Nakon toga treba uzeti u obzir kvalitetu izolacije koja je potrebna. Ako se razmatra buka kao dominantna pojava, tada će se najčešće koristiti guma kao izolacijsko sredstvo zbog izvrsnih izolacijskih mogućnosti koje pruža pri višem (zvučnom) spektru frekvencija. Ako je vibracija glavni problem onda su često opruge ili ovijes rješenje jer pružaju izolaciju pri relativno niskim frekvencijama.

Pri izboru mjesta postavljanja izolacijskih elemenata treba razmotriti ukupan sustav, njegovu stabilnost i intergritet u svim mogućim uvjetima opterećenja teretom ili udarnih opterećenja. Od presudne je važnosti da svi elementi izolacijskog sredstva imaju isti progib. Mnogi strojevi su teži na jednoj strani i nužno je osigurati elemente s većom krutošću kako bi imali potporu na težem kraju stroja. Cilj je dobiti stroj s jednakim progibom na svim elementima, a time i jednaku vlastitu frekvenciju u svim točkama potpore stroja.

Greške koje se često javljaju pri projektiranju izolacijskog sustava jesu [19]:

- *Nedostatna krutost postolja.* Ako će se na postolje motorne pumpe montirati izolacijsko sredstvo, sama konstrukcija postolja mora pružiti krutost potrebnu kako bi se održalo statičko poravnanje i okretni moment pri pokretanju. Slabo priključivanje izoliranog stroja je očit indikator neadekvatne krutosti postolja.

- *Montirana vlastita frekvencija je previsoka.* Na relativno lagane uređaje (npr. mali ventilatori) često se montiraju izolacijska sredstva koja su odabrana uzimajući kao bitniju značajku stabilnost, a ne izolaciju. Rezultat takvog odabira je povećanje vibracija i uveliko smanjenje efekta izolacije. Potrebno rješenje je inercijski blok koji pruža dodatnu masu i stabilnost. Često je osnovni okvir postolja montiran s metalnom pločom na dnu i cijeli okvir je ispunjen betonom. Prednost je dodatna torzijska krutost te znatno poboljšanje izolacijske učinkovitosti. [Slika 47.]



Slika 47. Inercijski blok [20]

- *Ljuljanje i nestabilnost.* Motor vozila mora biti stabilan u velikom rasponu različitih dinamičkih uvjeta i stoga projektiranje načina izoliranja uključuje i 'pričvrstne izolatore koji su sposobni oduprijeti se silama iz svih smjerova. Jednostavni izolatori koji nemaju dovoljnu snagu da bi se oduprijeli silama kidanja ili okretanja mogu biti opasni.
- *Drugi oblici vlastite frekvencije.* Postoji mogućnost da se uvedu vlastite frekvencije u smjeru različitom od glavnog smjera izolacije kada se koriste pričvrstni izolatori. Zbog toga se poprečna krutost i pričvrstna masa moraju provjeriti kako bi se osiguralo da će dinamika sustava biti zadovoljena u svim mogućim načima rada.
- *Nestabilnost pri prijelazu vlastite frekvencije.* Strojevi se sporo pokreću i zaustavljaju (potrebno je neko vrijeme da se smire) te mogu biti vrlo nestabilni prilikom prijelaza raspona vlastite frekvencije (npr. veliki vibrirajući strojevi za prosijavanje i centrifuge). Konstrukcija mora uključiti moguće granice prihvatljivih vibracijskih amplituda prijelaznih stanja.

6.3.2. Prijenos sila sa strukture na opremu

Ukoliko se želi postići dobar ishod, ovaj problem treba jako pažljivo razmotriti. Strukturalna vibracija uglavnom proizlazi iz strojeva montiranih na strukturu čije su frekvencije 12 - 25 Hz. Često je to slučaj kod postrojenja za preradu minerala gdje su drobilice, sita i transportne trake montirane na relativno fleksibilnim visokim čeličnim strukturama. Izolacija bi mogla biti potrebna zbog komfora operatora, zaštite elektrike i drugih instrumenata ili da bi se minimizirala oštećenja znana kao *false brinelling* koja se pojavljuju na ležajima ugrađenim u opremu dok je osovina ili vratilo u stanju mirovanja. [19]

Sljedeći primjer razmatra problem vibriranja elementa oplošja zgrade pri 12 Hz pri čemu ta vibracija ozbiljno utječe na pouzdanost sklopnog uređaja i instrumentacije u kontrolnoj kabini težine 800 kg. Potrebno je smanjenje vibracija za 80 %. [19]

Frekvencija sile je 12 Hz. *Dijagram učinkovitosti izolacije iz priloga 1.* pokazuje da je za frekvenciju sile od 720 CPM-a s 80 % izolacije potreban progib od 10 mm da bi vlastita frekvencija bila oko 5 Hz. Gornja tablica - *vodič statičkog otklona* pokazuje pak da je zahtjev progib opruge od 25 mm. Progib je prevelik za gumu. Alternativno rješenje bilo bi korištenje *airbag* izolatora čije je prigušenje znatno bolje, dok će učinkovitost izolacije biti slična.

Bez obzira na to koje se rješenje odabere, u obzir se moraju uzeti i 'živi tereti' (kao primjerice nekoliko tehničara koji se istovremeno nalaze u kabini) i potencijalna nestabilnost sustava. Tamo gdje se zahtijevaju niske vlastite frekvencije kako bi se postigla dobra izolacija, gotovo sigurno će biti potrebno razmotriti inerciju postolja kako bi se postigla potrebna masa i stabilnost.

6.4. Dinamički prigušivač

Dinamički prigušivač koristi svojstveni fazni pomak razonancije kako bi osigurao masu koja će apsorbirati energiju iz vibracijskog sustava i usput smanjiti amplitude. Minimizacija vibracija ovom metodom može se jedino razmatrati kod sustava s jednom frekvencijom uzbude.

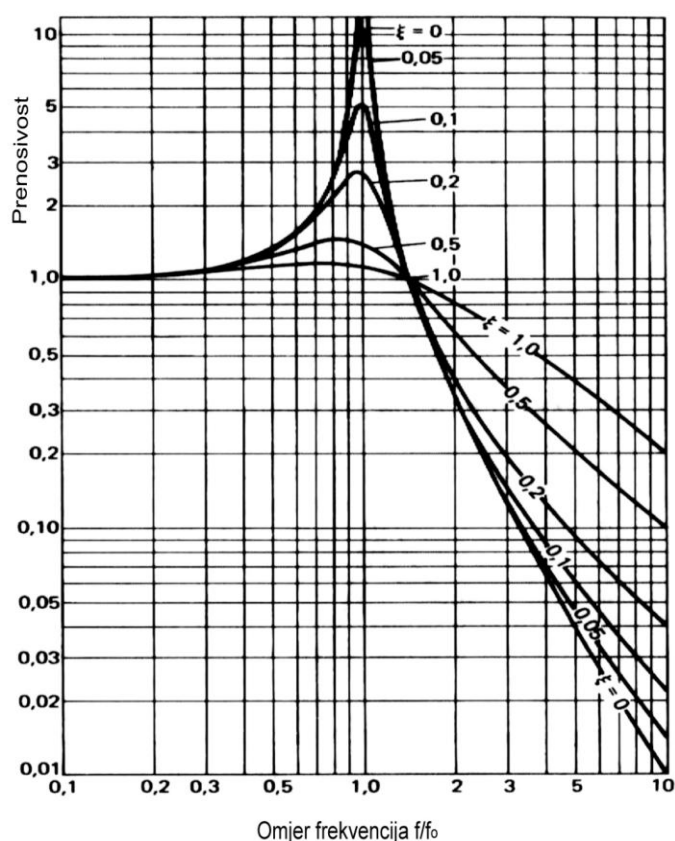
Tako primjerice jedan veliki gradski neboder u Sydneyu na najvišoj razini ima spremnik za vodu u slučaju požara. Montiran je na oprugama pa je njegova lateralna vlastita frekvencija ista kao prva forma (jednostavna konzola) vlastite frekvencije građevine. Kada se zgrada, uzbuđena vjetrom velike brzine, počinje njihati pri vlastitoj frekvenciji spremnik s vodom se

uspješno giba u suprotnoj fazi od građevine i tako apsorbira energiju. Dakle, smanjenje amplitude je vrlo značajno.

Isti princip se koristi na konstrukcijama za podupiranje motora automobila gdje se više malih utega (oko 2 kg) montiraju na gumenu podlogu pri vlastitoj frekvenciji koja je jednaka vlastitoj frekvenciji mosta motora. Rezultat je značajno smanjenje prenošenja vibracija i povećanje učinkovitosti vibracijskih izolatora koji povezuju most motora s kućištem. [19]

6.4.1. Teorija izolacije

Osnovni problem pri traženju rješenja izolacije vibracija je redukcija vibracijskih sila prenesenih s jedne strukture na drugu.



Slika 48. Krivulje apsolutne prenosivosti kao funkcija omjera frekvencija f/f_0 za razne omjere prigušenja [19]

Izolacijska sredstva su obično napravljena od gume ili metalnih opruga. Prenesena sila će biti jednaka trenutnom vektorskom zbroju sile prenesene preko opruge (proporcionalno s pomakom) i preko prigušivača (proporcionalno s brzinom) pretpostavljajući da su mase

opruge i prigušivača zanemarive u usporedbi s masom koju podupiru. Iz toga proizlazi izraz 'prenosivosti' koji se koristi za opisivanje teorijskih rezultata određene primjene izolacije.

Skup krivulja prikazanih na prethodnom dijagramu [Slika 48.] daju puno informacija o izolaciji vibracija. Na ordinati je omjer prenosivosti i prikazuje vrijednosti veće i manje od 1,0 gdje je sila koja ulazi u izolacijski sustav jednaka onoj koja izlazi iz sustava. Na apscisi je frekvencijski omjer sila, a prikazuje frekvencije iznad i ispod 1,0.

Ovih šest krivulja odgovaraju šest različitih koeficijenata prigušenja (ξ) raspoređenih od kritičnog $\xi = 1,0$ do teoretskog prigušenja $\xi = 0$.

Omjer prenosivosti teoretski postaje beskonačan u slučaju prigušenja jednakog nuli. Iako je izolacijski učin jako dobar za frekvencijski omjer vrijednosti 2,0 očito je da je to jako nestabilan sustav.

Na drugom kraju dijagrama su sustavi s visokim koeficijentom prigušenja (npr. suspenzija kod sportskih automobila). Imaju manje učinkovit efekt izolacije, ali puno bolju stabilnost preko cijelog raspona uzbuda.

Sustavi izolacija koji koriste spiralne čelične opruge imaju pri relativno visokim pomacima male koeficijente prigušenja (uobičajeno $\xi = 0,02$). U slučaju suspenzije motornih vozila nužno je imati prigušivače (amortizere) kako bi se osigurala stabilnost.

Sustavi koji koriste izolatore od gume ne trebaju posebne prigušivače jer guma i slični elastomeri imaju dobra prigušivačka svojstva. Učinkovitost izolacije nije tako dobra i generalno raspon pomaka u koji se mogu smjestiti je relativno mali. Koeficijenti prigušenja su obično $\xi = 0,2$. [19]

6.5. Primjer izračuna izolacija vibracija

Uzročnik pobude u vibrirajućem zaslonu rotira sa 720 min^{-1} (12 Hz). Zgrada u kojoj se zaslon nalazi također vibrira i gibanje ozbiljno utječe na stopu neuspjeha prekidača opreme i instrumentacije u kontrolnoj kabini montiranoj za pod. Kabina ima masu od 800 kg. Potrebno je smanjenje vibracija za 80 %. [19]

Prema dijagramu učinkovitosti izolacije iz priloga 1. se može očitati da za uznemirujuću frekvenciju od 720 min^{-1} i 80 %-tnu redukciju jakosti vibracija frekvencija poboljšanog

sustava mora biti oko 5 Hz. To zahtjeva statički progib od 10 mm podupirućeg izolacijskog sustava. Smjernice za statički progib pokazuju potrebu za oprugama progiba 25 mm. Potreban progib je samo malo prevelik za ugradnju gumenog izolacijskog sredstva.

800 kg mase je potrebno poduprijeti oprugama tako da težina svaku oprugu stisne za 10 mm. Oblik postolja kabine će odrediti gdje će se opruge postaviti. Za pravokutno postolje moglo bi se koristiti 12 izolatora. Jedni postavljeni u svakom kutu, a drugi postavljeni po dužini s jednakim razmakom među njima. Iz toga se može izračunati konstanta opruge:

$$k = \frac{F}{x} = \frac{800kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}}{12 \cdot 0.01m} = 65 \frac{kN}{m}. \quad (6)$$

Nakon toga treba odrediti raspored opruga odabranih od dobavljača. Uz ovo rješenje postoje i druge stvari koje treba uzeti u obzir [19]:

- Kabina mora biti stabilna za osobe koje rade u njoj i baza bi se (možda) morala opet izprojektirati kako bi se osigurala stabilnost pri radu.
- Potporni okviri postolja nemaju pod koji bi pružio dovoljnu krutost pa moraju biti strukturno čvrsti kako bi osigurali krutost i spriječili bilo kakav progib opreme.
- Za lagane strojeve, poput ventilatora, možda će biti potrebno dodati betonske mase postolju da mu se ukupna masa poveća tako da se teži izolatori koriste za osiguravanje stabilnosti.
- Za ljuljajuće gibanje, kao kod motora, slobodno stojeći izolatori su neprikladni za sprječavanje gibanja pa su potrebni ograničavajući izolatori kako bi se stroj mogao držati na mjestu. Primjer je montiranje motora na automobilu. Ono osigurava izolaciju od vibracija i sprječava da se motor olabavi zbog vibracija.
- Oprema može vibrirati u bilo kojem slobodnom pravcu. Ako se koriste ograničavajući izolatori, bit će potrebno razmotriti i vlastitu vibraciju u smjerovima drugačijim od glavnog smjera komponenata sustava koji su međusobno spojeni.
- Strojevi koji prelaze vlastitu frekvenciju izolirane opreme (s fleksibilnim postoljem) mogu postati nestabilni, a kod konstrukcije će se morati uzeti u obzir prihvatljive granice amplituda opreme.
- Sva izolacijska potpora mora imati isti progib i možda će biti potrebno mijenjati omjer opruga tamo gdje je masa opreme nejednako raspoređena.

7. VIBRACIJSKA ANALIZA KAO PREVENTIVNA METODA ZA ODRŽAVANJE ROTACIJSKE OPREME

Preventivno održavanje pokušava otkriti početak degradacije nekog mehanizma s ciljem ispravljanja greške prije nego li dođe do značajnog pogoršanja komponente ili opreme. Dijagnostičke mogućnosti preventivnog održavanja izrazito su porasle napretkom u senzorskim tehnologijama. Ti pomaci se zabilježavaju u području osjetljivosti senzora, većine i, što je danas jako bitno, cijene senzora.

Kao i kod bilo koje nove tehnologije pravilna primjena i trening je od izrazite važnosti. Ova se potreba izrazito odnosi na području prediktivnog održavanja koja postaje sve sofisticiranija. Većina stručnjaka u ovom području kao i većina dobavljača opreme slaže se da se takva oprema treba koristiti samo profesionalno.

7.1. FFT vibracijski analizatori

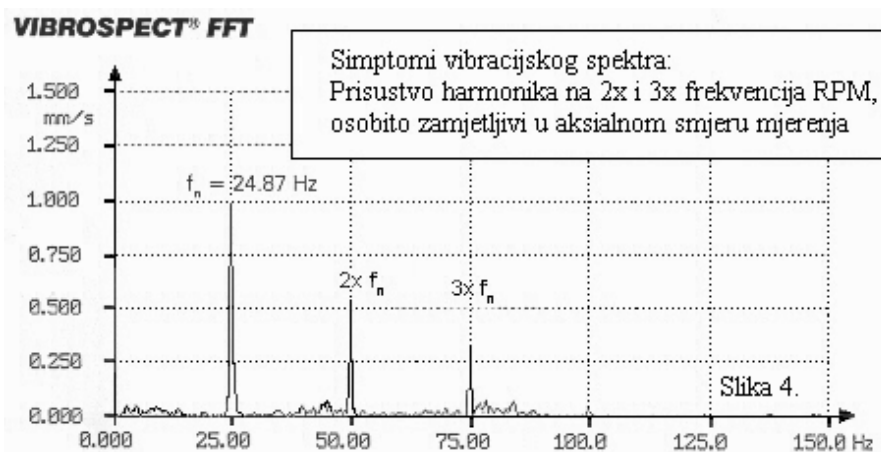
Uštede u održavanju rotacijskih sustava uz primjenu mjerenja vibracija i centriranja se ostvaruju kroz sljedeće aspekte:

- značajno produženje vremena između dvaju kvarova (MTBF - Mean Time Between Failures) na rotacijskim strojevima uz pravilno centriranje;
- ušteda u radnim satima potrebnim za centriranje laserskom metodom te otklanjanje posljedica uslijed kvarova izazvanim lošim centriranjem;
- smanjenje potrošnje energije kod ispravnog centriranja.

Pojava necentričnosti može se na rotacijskim kuplanim strojevima otkriti uz uporabu FFT analizatora vibracija, gdje se spomenuta informacija može dobiti u radu stroja tj. prateći ga tokom eksploatacije. Tipično se tada otkrivaju harmonici vibracija u radijalnom i aksijalnim smjeru na dominantnm harmoniku (1 x RPM), odnosno na njegovim harmonicima (2 x RPM, 3 x RPM itd.). Ujedno, FFT analizatorom vibracija se može nakon centriranja i dodatno provjeriti novo stanje jer pri novom mjerenju viši harmonici uz ispravno centriranje moraju biti rudimentarni.

U realnoj praksi i dobro organiziranom održavanju rotacijskih strojeva to bi i trebao biti ispravan put u nadzoru nad strojevima, gdje se periodičkim mjerenjima utvrđuje stanje vibracija i na taj način prati stanje stroja.

Slika 49. prikazuje FFT spektar vibracija pri kuplanju između elektromotora i pumpe u svrhu utvrđivanja prisustva necentričnosti u toku eksploatacije strojeva. Mjerenje je izvršeno uređajem Vibrospect FFT.

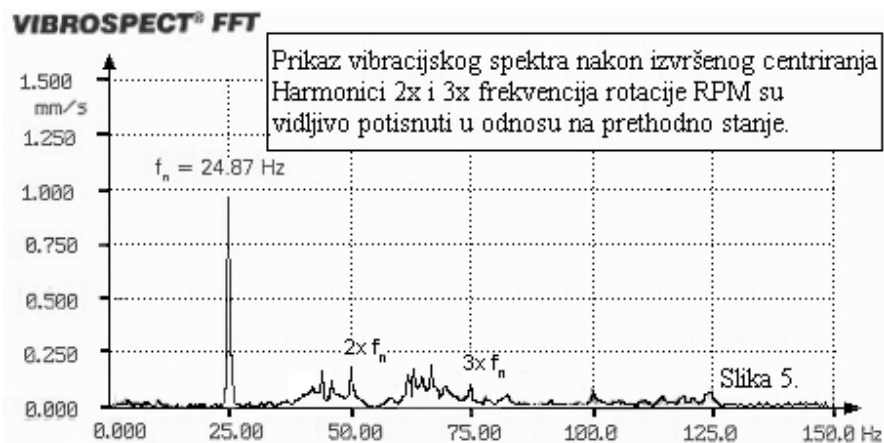


Slika 49. FFT spektar vibracija prije centriranja [14]

Početno stanje necentričnosti [14]:

- pomak (offset);
 $V = + 0,23 \text{ mm};$
 $H = - 0,07 \text{ mm};$
- kutna necentričnost;
 $V = + 1,14 \text{ mm} / 100 \text{ mm};$
 $H = - 0,03 \text{ mm} / 100 \text{ mm}.$

Na slici 50. je dan FFT prikaz vibracijskog spektra nakon izvršenog centriranja. Drugi i treći harmonik vibracija su značajno potisnuti u odnosu na početno stanje na prethodnoj slici. Mjerenje je izvršeno uređajem Vibrospect FFT.

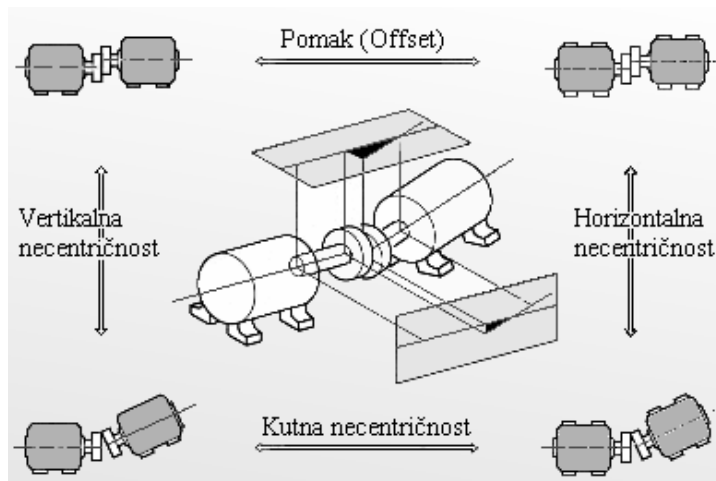


Slika 50. FFT spektar vibracija nakon centriranja [14]

Stanje nakon centriranja [14]:

- pomak (offset);
 $V = + 0,03 \text{ mm};$
 $H = 0,00 \text{ mm};$
- kutna necentričnost;
 $V = + 0,04 \text{ mm} / 100 \text{ mm};$
 $H = + 0,04 \text{ mm} / 100 \text{ mm}.$

Iako je primjena FFT vibracijskih analizatora ispravan put u održavanju rotacijskih strojeva, ipak se pri takvom mjerenju utvrđuje samo da je necentričnost strojeva pri kuplanju prisutna, ali ne i sama veličina necentričnosti, odnosno korekcijske vrijednosti potrebne da bi se strojevi mogli dovesti u istu os rotacije. To je zbog toga što harmonici vibracija nisu isključivo i samo uvjetovani necentriranošću strojeva pri kuplanju te se mjerenjem FFT analizatorom dobiva povratna informacija o odzivu na pobudu uvjetovanu necentričnosti pri kuplanju. Jednako tako i rotacijska brzina stroja, momenat sila, kao i vrsta kuplanja utječu na nivo vibracija koji se očituje pri takvom mjerenju. Kao zaključak gornjeg, primjena FFT analizatora je vrlo bitna i pravilna metoda za otkrivanje i praćenje necentričnosti strojeva pri kuplanju, jer se provodi bez zaustavljanja stroja, odnosno tijekom njegove eksploatacije. No da bi otkrivenu necentričnost korigirali neophodno je pristupiti korekcijskim zahvatima pomicanja strojeva jedan u odnosu na drugi kako bi ostvarili zajedničku os rotacije strojeva. Takvo centriranje moguće je provesti u stanju mirovanja stroja.



Slika 51. Vrste necentričnosti [14]

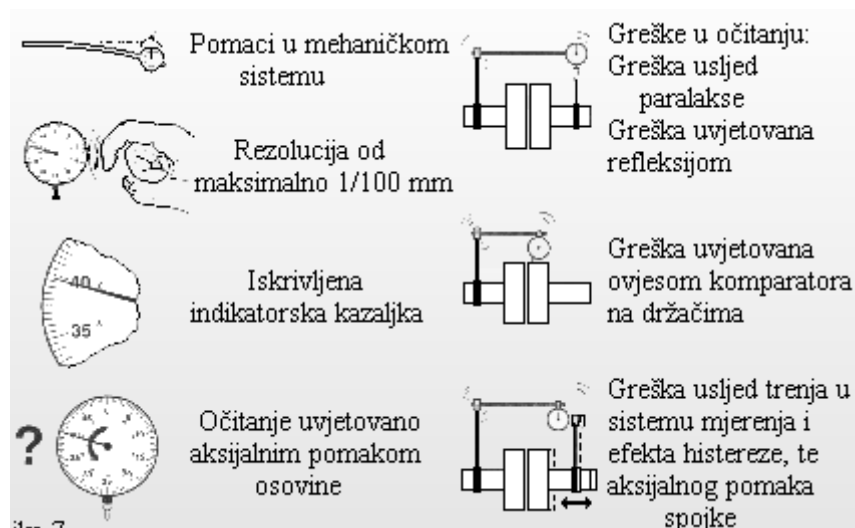
Slika 51. prikazuje moguće vrste necentričnosti u odnosu na idealnu poziciju dvaju strojeva. Dva rotacijska stroja su centrirana kada su im osi rotacije kolinearne. Kao što je na slici vidljivo, necentričnost osovine dvaju strojeva može se promatrati kroz četiri osnovna pojma necentričnosti i to:

- vertikalni pomak (offset),
- vertikalna kutna necentričnost,
- horizontalni pomak (offset),
- horizontalna kutna necentričnost.

Da bi se postiglo dobro centriranje kuplanih strojeva mora postojati mogućnost mjerenja ova četiri stupnja slobode međusobnog položaja između dva rotacijska stroja.

7.2. Centriranje komparatorima

Jedan od načina kako se danas još uvijek rješava problem necentriranosti je uporaba mehaničkih indikatora. Ova zastarjela i nedovoljno pouzdana metoda zahtjeva izuzetno iskusne operatere, kao i mnogo vremena da se centriranje provede. Ta metoda, uslijed grešaka koje su brojne u postupku mjerenja, daje ograničene rezultate centriranja koji po točnosti uz najveće zalaganje i visikoiskustveno osoblje dosežu do $1/(100 \text{ mm})$. No, takva točnost centriranja u realnoj praksi je vrlo rijetka upravo zbog grešaka koje unose mehanički komparatori.



Slika 52. Greške u postupku centriranja [14]

Slika gore [Slika 52.] prikazuje greške koje se unose u postupak centriranja pri uporabi mehaničkih indikatora.

Još je gori slučaj kada se centriranje provodi uz uporabu mehaničkih letvi, ravnala ili slično, gdje se na bazi procjene okom paralelnosti na samoj spojci zaključuje o kvaliteti centričnosti strojeva koji su kuplani. Kako je mogućnost rezolucije ljudskog oka ograničena na 1/10, takva se metoda centriranja uopće ne može smatrati kao svrsishodna u smislu održavanja i eksploatacije strojeva u današnjoj modernoj proizvodnji i povišenim zahtjevima u eksploataciji strojeva. Gore opisane metode su jednostavno neprimjenjive u slučaju kada je potrebno centrirati ne samo dva stroja, nego više strojeva u lancu u jednu os rotacije.

8. OPREMA ZA MJERENJE VIBRACIJA

Prema proizvođaču *Prüftechnik* uređaji za mjerenje vibracija, oštećenja ležaja, kavitacije, broja okretaja, temperature te balansiranja rotacijskih tijela podijeljeni su u tri skupine:

- mobilni uređaji,
- uređaji za permanentni nadzor,
- uređaji za balansiranje rotacijskih tijela.

8.1. Mobilni uređaji

Mogućnosti uređaja *FFT⁸ Data Collector* i *FFT dvokanalnog analizatora vibracija*, uz mogućnost detekcije kvara ležaja i detekcije kvara zupčanika su mjerenje anvelope⁹ signala, rad u vremenskoj i frekvencijskoj domeni ili cepstrum¹⁰ analiza vibracija te balansiranje rotacijskih tijela. Od uređaja razlikuje se *Vibrotip* koji predstavlja uređaj za mjerenje vibracija, oštećenja ležaja, kavitacije, broja okretaja i temperature.

Mobilni uređaji iz aktualnog kataloga *Prüftechnik* proizvoda jesu:

- VibXpert, VibXpert II;
- Vibscanner;
- Vibrotip.

8.1.1. VibXpert, VibXpert II

VibXpert je profesionalni potpuno opremljen 1-kanalni ili 2-kanalni FFT signal kolektor ili signal analizator koji omogućuje jednostavno mjerenje stanja rotacionih strojeva koji se nalaze u mnogim granama procesne industrije kao hidro i termo elektranama, petrokemiji, industriji papira itd.

VibXpert II je najnoviji, profesionalni, potpuno opremljen 1-kanalni ili 2-kanalni FFT signal kolektor odnosno signal-analizator koji omogućuje intuitivno rukovanje pri mjerenju

⁸ Fast Fourier Transform

⁹ Anvelope - krivulja koja u svakoj svojoj točki dodiruje po jednu od beskonačno mnogo istovrsnih krivulja u ravnini.

¹⁰ Cepstrum - vrsta transformacije spektra signala.

stanja rotacijskih strojeva koji se nalaze u mnogim granama procesne industrije [Slika 53.]. Ovakvi uređaji koriste se u hidroelektranama i termoelektranama, petrokemiji, industriji papira itd. [6]

Oba uređaja prihvaćaju procesne parametre i mjerne signale koji daju informacije o stanju vibracija, stanju ležaja te ih pohranjuju i obrađuju u softveru za održavanje procesnih sustava. U ovom slučaju radi se o *Omnitrend* softveru, o kojem će nešto kasnije biti riječi.

VibXpert ima nešto manje mjernih mogućnosti od VibXpert-a II pa će u sljedećih par navoda biti opisane isključivo karakteristike VibXpert-a II. U većini ostalih karakteristika uređaji su slični.



Slika 53. VibXpert II [6]

Tehničke karakteristike uređaja VibXpert II [6]:

Računalo:

- procesor - Marvell PXA320, 806 MHz, koji omogućuje iznimno brzu akviziciju signala;

Monitor:

- TFT-LCD, nereflektivni zaslon;
- dubina boja: 18 bit (262 144 boja);

- rezolucija: VGA (480 x 640 piksela) sa 140 ppi¹¹;
- dimenzije zaslona: 87 x 116 mm;

Memorija:

- radna memorija: 128 MB RAM;
- memorija za pohranu: 2 GB do 8 GB Compact Flash;

Sučelja:

- USB i Ethernet komunikacija;
- RS 232¹², do 115 kBaud¹³;
- USB host za ispis;
- USB slave za izmjenu podataka s Omnitrend-om;
- Ethernet - 100 Mbit (100Base T), 10 Mbit (10Base T);

Baterija:

- Li-Ion baterija (7,2 V/4,8 Ah - 34 Wh);
- 8 sati rada;
- vrijeme punjenja manje od 5 h, baterija promjenjiva;

Masa:

- 1,15 kg;

Radno okruženje:

- IP 65 klasa zaštite, otporan na prašinu i vodu;
- temperaturno područje rada: -10°C do +60°C;

Mjerne karakteristike:

- dvokanalni data kolektor i signal-analizator;
- ekstremno visoka spektralna rezolucija: 102 400 linija pri FFT spektralnom prikazu;
- maksimalna frekvencija pri FFT analizi 51,2 kHz;
- minimalna frekvencija pri FFT analizi 0,5 Hz;

¹¹ ppi - pixels per inch

¹² RS-232 je standardni međusklop za serijski prijenos binarnih podataka između datotečne spojne opreme DTE (eng. Data Terminal Equipment) i datotečne komunikacijske opreme DCE (eng. Data Communication Equipment).

¹³ baud - symbols per second or pulses per second

- opcija prikaza u sedam prozora;
- balansiranje metodom "na licu mjesta" u 1 ili 2 ravnine.

Osnovne osobine VibXpert II instrumenta [6]:

- intuitivno rukovanje na grafičkom monitoru u boji;
- brza obrada i akvizicija mjerenog signala ostvarena optimizacijom koda i naprednom tehnologijom procesora;
- ergonomičnost uređaja;
- praktične funkcije analize i predefinirane obrade izmjenjenog signala;
- mogućnost spajanja gotovo svih tipova mjernih senzora za obradu raznih signala (moguće spajanje senzora tipa mjernih mostova);
- dugotrajan rad uz ugrađene kvalitetne punjive baterije i velikim kapacitetom memorije za pohranu izmjerenih signala;
- status LED- indikacija LED diodama o stanju izmjerenih veličina prema ISO standardu za stanja vibracija ili prema korisnički definiranim alarmnim nivoima;
- čvrsto, lagano i kompaktno kućište.

Mjerne mogućnosti uređaja i načini rada [6]:

Multimode - mjerenje karakterističnih ukupnih vrijednosti:

- vibracije (vibracijska akceleracija, vibracijska brzina, vibracijski pomak);
- struja, napon (AC / DC);
- shock pulse - udarni impulsi za mjerenje stanja ležaja;
- temperatura;
- broj okretaja;

Signali:

- amplitudni spektar akceleracije, brzine, pomaka, struje, napona;
- spektar anvelope signala akceleracije, brzine, udarnih impulsa, struje, napona;
- vremenski prikaz akceleracije, brzine, pomaka, struje, napona;
- fazni prikaz / mjerenje faze signala dvaju kanala;

- analiza pri zasustavljanju stroja: ukupna vrijednost / amplituda / spektar prikaza po RPM u Niquist ili Bode-ovom dijagramu;
- prikaz orbite (filtrirane / nefiltrirane);
- cepstrum;
- udarni test za analizu vlastite frekvencije sustava;
- ODS- *Operating Deflecting Shape Analysis*;

Route - mjerenje u zadanim rutama:

- predefinirana zadana mjerenja po funkcijama, frekventnom opsegu, načinu obrade za mjerna mjesta na strojevima;
- indikacija mjerenja u ruti pomoću strukture stabla / indikacija listingom mjernih mjesta ili grafikom;

Memoriranje (opcija):

- memoriranje ukupnih vrijednosti ili spektra signala;
- intervalno / inicirano određenim uvjetom;
- *pre -post history*;
- Balansiranje (opcija):
- balansiranje u jednoj ili dvije ravnine metodom "na licu mjesta";
- dvokanalno simultano mjerenje u svrhu statičkog ili dinamičkog balansiranja;
- grafički prikaz mjesta debalansa;
- tekstualni vodič uputa pri balansiranju;
- utvrđivanje kvalitete balansiranja prema DIN ISO 1940;
- specijalne mogućnosti pri postupku balansiranja;
- sumarijacija korekcijskih masa;
- mogućnost pohrane karakterističnih faktora pri balansiranju za iduće balansiranje;
- softver za balansiranje je pohranjen u VibXpert-u - potrebno ga je aktivirati lozinkom;
- mjerenje vrijednosti vibracija, stanja ležaja, temperature i broja okretaja;
- FFT spektralni amplitudni prikaz signala;
- prikaz anvelope signala;

- prikaz signala u vremenskoj domeni;
- FFT prikaz harmonika redova vezano na osnovni harmonik;
- cepstrum analiza;
- "coast down" mjerni prikaz signala;
- mjerenje faze signala (također i "cross channel" prikaz);
- prikaz orbite;
- prihvrat i pohrana procesnih podataka (npr. prikaz pritiska);
- prikaz inspeksijskih zapažanja u procesnoj proizvodnji (npr. nivo fluida).

Dijagnostičke mogućnosti uređaja [6]:

- indikacija karakterističnih frekvencija kvarova za dijelove strojeva (npr. debalans, kvar u namotajima, necentričnost itd.) te indikacija karakterističnih frekvencija kvarova za ležajeve, zupčaste prijenosnike (getrije) uvelike pojednostavljuje otkrivanje i detekciju kvarova pri dijagnostici stanja rotacijskog stroja;
- funkcija višestrukog kursora za preciznu evaluaciju signala FFT spektra;
- trending funkcija izmjerenih nivoa vibracija;
- pohranjivanje u memoriju vrijednosti ukupnih nivoa kao i FFT spektara signala;
- *waterfall* i kaskadni prikaz dijagrama FFT spektra.

Druge mogućnosti uređaja [6]:

- sinkrono dvokanalno mjerenje signala za dijagnozu kompleksnih kvarova na rotacijskim strojevima;
- neograničeni kapacitet memorije za pohranu signala uz primjenu flash memorijskih kartica;
- četiri LED indikacije (crvena – žuta – zelena – plava) indiciraju nivo alarmnog stanja u skladu sa ISO standardom;
- optički senzor automatski kontrolira osvjetljenje tastature;
- IP65 zaštita kućišta protiv prašine i vlage idealno za zahtjevne uvjete mjerne okoline;
- priključak za K tip temperaturnog senzora;

- priključak za slušalice i stroboskopsku lampu.

Ergonomičnost [6]:

- lagana upotreba i navigacija pri mjerenju sa *joy-stick*-om;
- korisnička komunikacija pomoću ikona na zaslonu;
- kablovi obilježeni bojama u svrhu pomoći pri spajanju na uređaj;
- *help* funkcija pri mjerenju uvijek na raspolaganju;
- višjezični govorni operativni sustav pri komunikaciji u mjerenju;
- prijenosna torba za uređaj prilagođena industrijskim uvjetima mjerenja;
- automatska identifikacija mjernih mjesta i zadanih mjernih veličina uz uporabu inteligentnog mjernog senzora (Vibcode);
- nadogradnja na dvokanalni uređaj moguća uz upis "lozinke".

8.1.1.1. Vibcode

Vibcode je inteligentni mjerni senzor koji sam prepoznaje mjerne lokacije na pridruženom stroju, mjerne veličine koje na tim lokacijama treba mjeriti te alarmne limite koji su zadani za pojedinu mjernu lokaciju. Vibcode mjerni senzor ostvaruje idealan kontakt sa mjernom lokacijom pomoću ugrađenog mjernog kodnog prstena koji se nalazi na pridruženoj mjernoj lokaciji. Također, ukoliko je softverom Omnitrend zadano za tu mjernu lokaciju da se izvrši i FFT mjerenje, instrumenat VibXpert uzima i takvu vrstu mjerenja i pohranjuje je u svoju memoriju. Vibcode mjerni senzor osigurava kako širokopojasno mjerenje stanja vibracija, tako i mjerenje metodom SPM (*Shock Pulse Measurement*) koje se koristi kod analize stanja ležajeva i nivoa kavitacije. [6]

VibXpert Vibcode mjerni set, koji pored mogućnosti koje su navedene za uređaj VibXpert, ima i inteligentni mjerni dekodirer Vibcode detektor koji sam raspoznaje mjerna mjesta i mjerne veličine koje na tim mjernim mjestima treba izmjeriti, a koji su za ta mjerna mjesta programski zadani u softveru Omnitrend.

Za rad sa Vibcode detektorom potrebno je da se na odabrana mjerna mjesta postave mjerni prstenovi koji se mogu ili učvrstiti navojem u kućište stroja ili lijepiti specijalnim ljepilom. U

tako pripremljen prsten čija je konfiguracija jednoznačno pridružena određenom mjernom mjestu ulaže se plastični prsten čije kodiranje određuje također softver Omnitrend. Kodiranje znači zapravo trganje određenih izdanaka na prstenu, gdje se pri tome jednoznačno određuje mjerna točka od 7760 mogućih.

Pri mjerenju podaci o mjernim rutama koje sadrže mjerna mjesta u procesnom parku koja su jednoznačno označena kodnim prstenovima pomoću softvera Omnitrend, prebacuju se iz PC-a RS 232 komunikacijom u uređaj VibXpert. U uređaj VibXpert se priključuje Vibcode senzor i njegov vrh se zakretom ulaže u kodni prsten. Na vrhu Vibcode detektora nalazi se sustav koji detektira koje je to mjerno mjesto unutar procesnog parka i što je na tom mjernom mjestu zadana da se izmjeri. VibXpert zatim očitava mjerne veličine i pohrani ih u memoriju. Taj se postupak ponavlja za svako mjerno mjesto u zadanoj mjernoj ruti. Nakon toga se podaci prebacuju u PC radi daljnje obrade, printanja izvještaja itd. [6]



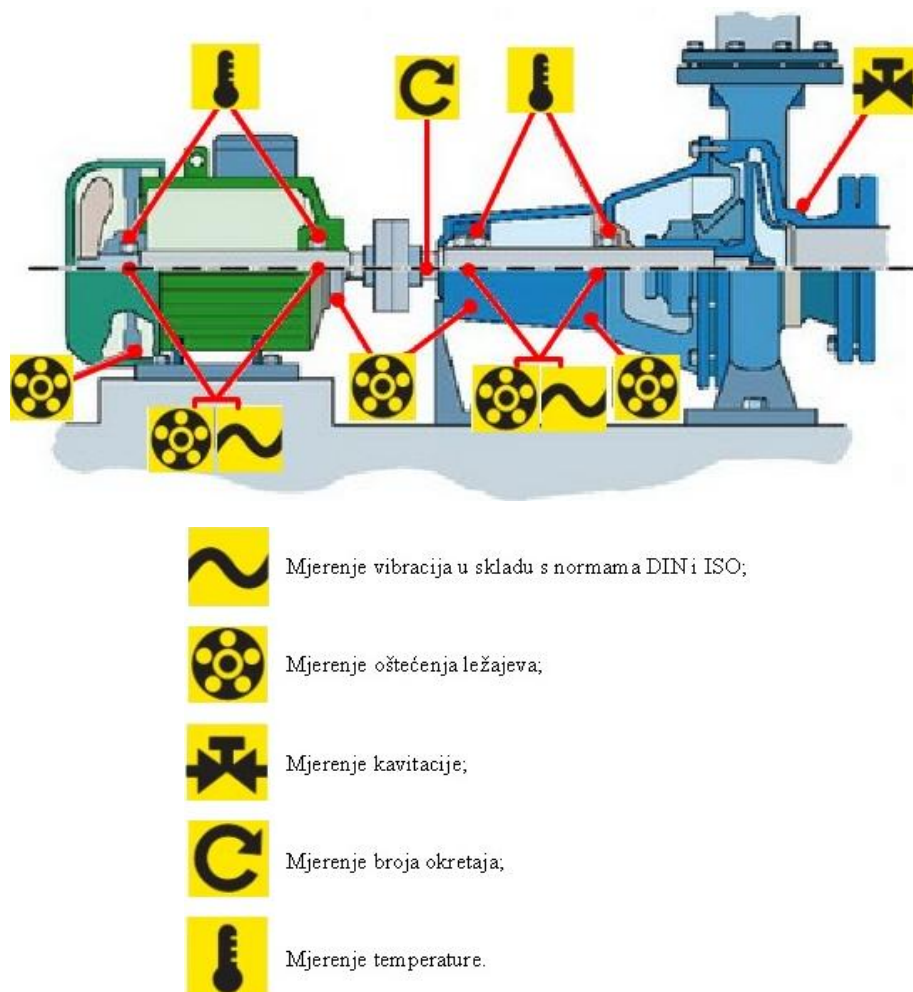
Slika 54. Organizacija Vibcode mjernog sustava [6]

Organizacija Vibcode mjernog sustava prikazana je slikom [Slika 54.]:

1. OMNITREND specificira mjerne lokacije i mjerne veličine na lokacijama;
2. VIBCODE detektor se pri mjerenju utiče u kodne prstenove na mjernim mjestima;
3. VIBCODE prepoznaje mjerno mjesto i mjeri zadane veličine pod točkom br.1;
4. uz VIBCODE spojen na VIBXPART moguće je mjeriti bilo kojim redoslijedom;
5. mjerni rezultati dobiveni mjerenjem u prikazanom ciklusu prebacuju se pomoću RS 232 komunikacije u PC;

6. OMNITREND instaliran u PC-u preuzima odaslane podatke iz VIBXPERT-a, razvrstava ih po mjernim lokacijama, po potrebi mijenja konfiguraciju baze podataka, radi trending stanja, alarmira po prelasku alarmnih nivoa te izdaje raporte o svim zahtjevanim podacima cjelokupnog nadziranog procesnog sustava.

Važno je napomenuti da se Vibcode uređaj i mjerna mjesta koja su određena mjernim rutama mogu kombinirati tj. u mjernoj ruti mogu biti i mjerna mjesta koja su označena mjernim kodnim prstenovima, kao i mjerna mjesta koja ne sadrže kodne prstenove, nego su samo zadana u Omnitrend softveru i označena npr. permanentnom bojom na pojedinim mjernim mjestima na rotacijskim strojevima. Na slici 55. je prikazan primjer mjerenja sa uređajem Vibscanner kada se upotrebljava u mjerenju bez kodnih prstenova, a jednako slika vrijedi i za mjerenje s uređajem u sprezi s montiranim kodnim prstenovima na prikazane mjerene lokacije.



Slika 55. Primjer mjernih točaka i mjernih veličina [6]

8.1.2. Vibscanner

Vibscanner predstavlja profesionalni uređaj za mjerenje i dijagnozu stanja rotacijskih strojeva. Svi senzori za mjerenje su integrirani u samom uređaju tako da je uređaj potpuno cjelovit i spreman za mjerenje u svakom trenutku. Vibscanner je i "data kolektor" koji omogućuje pohranu izmjerenih podataka u svoju memoriju i prebacivanje pohranjenih podataka na PC na kojem je instaliran softver Omnitrend. Softver pohranjene podatke procesira i provjerava jesu li izmjereni nivoi u skladu sa zadanim alarmnim limitima. Vizualizacija izmjerenih signala ostvarena je "trend" dijagramima, FFT dijagramima ili prikazom vremenskog signala. Na raspolaganju su i razne funkcije izvještaja koje podupiru dokumentiranje i izvješćivanje izmjerenih stanja rotacijskih strojeva. Uz uporabu Vibcode inteligentnog senzora ostvarena je automatska identifikacija mjernih mjesta i zadanih mjernih veličina u kompletnom procesnom parku koji se nadzire Vibscanner-om. [7]

Osnovne osobine Vibscanner instrumenta [7]:

- *trending* - stanje rotacijskog stroja u vremenskom prikazu;
- analiza signala - prikaz u vremenskoj domeni, prikaz orbite i faznog kuta;
- dijagnoza strojeva - pažljivim ispitivanjem FFT spektara ili analizom anvelope signala;
- balansiranje - balansiranje rotora u dvije ili jednoj korekcijskoj ravnini;
- optičko lasersko centriranje - centriranje strojeva montiranih horizontalno ili vertikalno.

Mjerne mogućnosti uređaja [7]:

- mjerenje vrijednosti vibracija, stanja ležaja, temperature i broja okretaja;
- FFT spektralni amplitudni prikaz signala;
- prikaz anvelope signala;
- prikaz signala u vremenskoj domeni;
- FFT prikaz harmonika redova vezano na osnovni harmonik;
- mjerenje faze signala;

- prikaz orbite;
- prihvati i pohrana procesnih podataka (npr. prikaz pritiska);
- prikaz inspekcijskih zapažanja u procesnoj proizvodnji (npr. nivo fluida).

Dijagnostičke mogućnosti uređaja [7]:

- indikacija karakterističnih frekvencija kvarova za dijelove strojeva (npr. debalans, kvar u namotajima, necentričnost itd.) te indikacija karakterističnih frekvencija kvarova za ležajeve, zupčaste prijenosnike (getribe) uvelike pojednostavljuje otkrivanje i detekciju kvarova pri dijagnostici stanja rotacijskog stroja;
- funkcija višestrukog kursora za preciznu evaluaciju signala FFT spektra;
- trending funkcija izmjerenih nivoa vibracija;
- pohranjivanje u memoriju vrijednosti ukupnih nivoa kao i FFT spektara signala;
- kaskadni prikaz dijagrama FFT spektra u Omnitrend softveru.

Vibscanner Vibcode mjerni set, koji pored mogućnosti koje su navedene za uređaj Vibscanner, ima i inteligentni mjerni dekodirani Vibcode detektor koji sam raspoznaje mjerna mjesta i mjerne veličine koje na tim mjernim mjestima treba izmjeriti, a koji su za ta mjerna mjesta programski zadani u softveru Omnitrend.

8.1.3. Vibrotip

Vibrotip je uređaj s pet mjernih funkcija. Radi se o jedinstvenom uređaju na svjetskom tržištu jer posjeduje mogućnost mjerenja čak pet mjernih veličina i to sa ugrađenim mjernim sondama [8]:

1. mjerenje vibracija u skladu s normama DIN i ISO,
2. mjerenje oštećenja ležajeva,
3. mjerenje kavitacije,
4. mjerenje broja okretaja, i
5. mjerenje temperature.

Vibrotip dolazi na tržište u četiri varijante koje se razlikuju po opremi i mogućnostima koje uređaj može u svojem radu pružiti. [8]

1. Vibrotip Multimeter

Uređaj koji radi kao jednostavan multimeter i na svojem LCD zaslonu daje vrijednosti odabrane mjerene veličine.

2. Vibrotip Maintenance Package

Uređaj koji ima mogućnosti kao instrument naveden prethodno, ali ima i mogućnost povezivanja s PC-om u svrhu podrške sa softverom.

3. Vibrotip Trending Package

Uređaj koji ima mogućnost mjerenja pet navedenih mjernih veličina te ima softver podršku pod oznakom Omnitrend koja omogućuje kreiranje baze mjernih točaka unutar procesnog parka strojeva, kreiranje mjerenih ruta po odabranim mjernim mjestima u procesnom parku, stvaranje baze podataka izmjerenih veličina, generiranje trendinga stanja, printanja raporta, alarmiranja po sustavu dvostrukog nivoa alarma itd.

4. Vibrotip Vibcode Package

Mjerni set koji pored mogućnosti koje su navedene za uređaj Vibrotip Trending Package ima i inteligentni mjerni dekodir Vibcode detektor koji sam raspoznaje mjerna mjesta i mjerne veličine koje na tim mjernim mjestima treba izmjeriti, a koji su za ta mjerna mjesta programski zadani u softveru Omnitrend.

8.2. Uređaji za permanentni nadzor

8.2.1. Vibroweb

Vibroweb je dinamički sustav za nadzor rotacijskih strojeva čije se mjerne performanse kreiraju "na licu mjesta" u samoj eksploataciji instaliranog mjernog sustava. Kao mjerni senzori mogu biti upotrijebljeni različiti tipovi senzora. "Plug-N Play" mjerne kartice preko kojih se spaja mjerni senzor na matičnu ploču omogućuju konfiguraciju mjernih ulaza za 32 mjerna kanala. Dodatno na raspolaganju su još osam ulaznih mjernih ulaza za mjerenje brzine rotacije stroja ili njegovih segmenata. Svi senzori su napajani istovremeno tako da su i svi mjerni ulazi praktički stalno u mjernom procesuiranju. Daljinski nadzor strojeva uz instalaciju Vibroweb sustava moguće je ostvariti s radnog stola iz ureda. Indikacija alarmnih stanja na mjernim lokacijama ostvariva je putem Internet Browsersa. [9]

Tipične aplikacije [9]:

- standardni rotacijski strojevi (elektromotori, pumpe, ventilatori);
- strojevi s varijabilnom brzinom vrtnje i opterećenja (reduktori, varijatori, getribe, ekstruderi);
- strojevi s kliznim ležajevima.

Osnovne osobine Vibroweb mjernog sustava [9]:

- kompatibilnost s gotovo bilo kojim tipom senzora (ICP, PT100, strain gage);
- 32 analogna ulaza (16 x 2 sinkrona);
- 8 taho/impulsna ulaza;
- 4 digitalna ulaza / 4 digitalna izlaza;
- mjerne veličine koje se mjere i pohranjuju (signal u vremenskoj domeni, FFT spektar, integracija FFT spektara, anvelopa signala, orbita, *Shok Pulse* mjerni signal, vibracijska akceleracija - RMS, vibracijska brzina);
- "Plug-N Play" mjerne kartice za prilagodbu ulaznih senzora na mjerni sustav;
- kratak mjerni ciklus svakog mjernog mjesta;
- programiranje mjerne konfiguracije putem Omnitrend softvera;
- umreženje sustava (Ethernet / Internet);
- samostalna operativnost mjernog sustava – PC nije potreban za izvršavanje mjerenja;
- sofisticirano alarmiranje;
- Vibroweb mjerna konfiguracija gdje se svi mjerni senzori napajaju istovremeno, dakle, i obrađuju istovremeno (time je postignuto da je odziv Vibroweb sustava brz u odnosu na ostale konvencionalne mjerne sustave gdje se mjerne lokacije obrađuju u rutama jedna za drugom – sustav reagira trenutno na svaku promjenu stanja stroja);
- Vibroweb konfiguriran na taj način je, uz opisane performance, pogodan za mjerenje strojeva s varijabilnom brzinom vrtnje i uz promjenjivo opterećenje, a na kojima su pojave oštećenja mehaničkih dijelova vrlo vjerojatne;

- za slučaj ostalih strojeva kod kojih se u praksi ne očekuju trenutni razvoj oštećenja i koji ne rade u gore opisanim režimima Vibroweb se može konfigurirati da se mjerne lokacije s mjernim zadaćama obrađuju sekvencionalno jedna za drugom (za veliki dio rotacijskih strojeva ova metoda u potpunosti zadovoljava, ali važno je imati na umu da je uz takvu konfiguraciju mjernog sustava moguće da brze promjene u oštećenju ili pojave kvara na stroju neće biti detektirane istog trenutka).

8.2.2. *Vibnode*

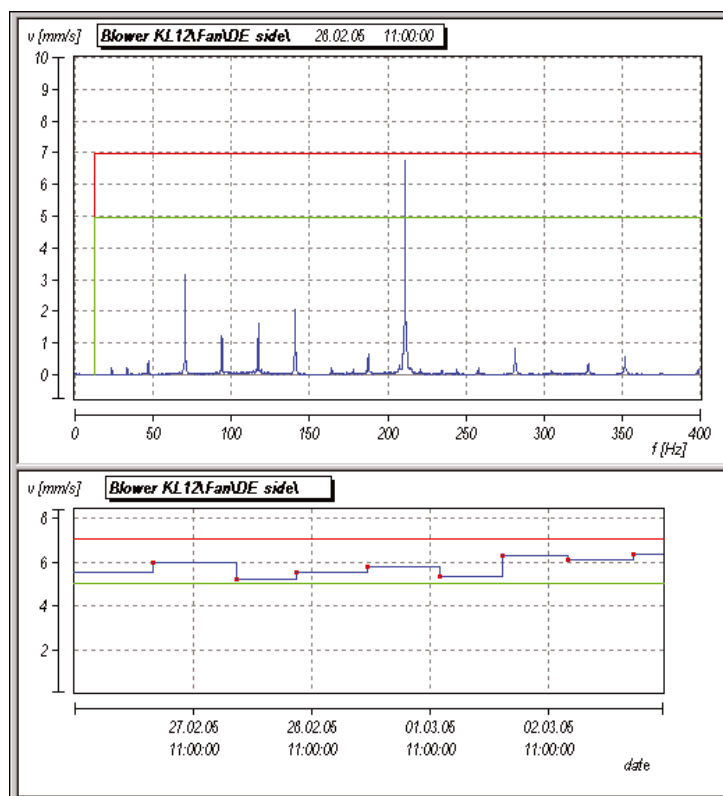
Vibnode je sustav za nadzor rotacijskih strojeva namijenjen prvenstveno za nadzor standardnih strojeva dominantnih u tekućoj procesnoj proizvodnji kao primjerice [10]:

- elektromotora,
- ventilatora,
- pumpi,
- nadzor ležaja s kotrljajućim elementima,
- nadzor zupčastih prijenosnika, reduktora.

Osnovne osobine Vibnode mjernog sustava [10]:

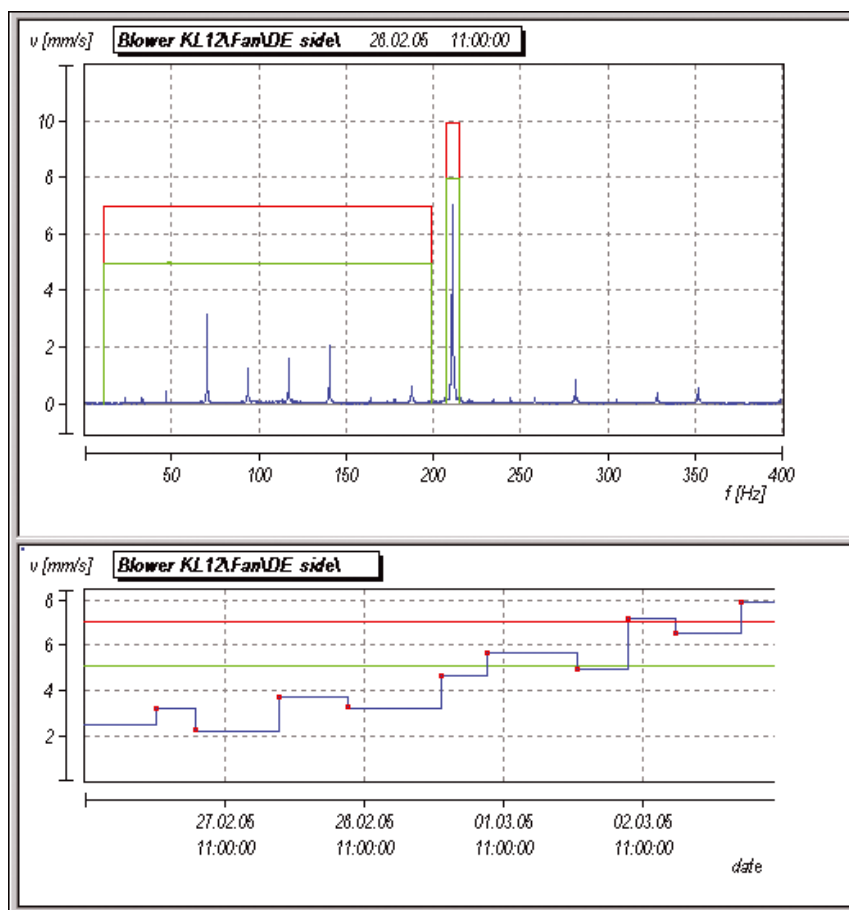
- moguć nadzor 6 ili 12 mjernih kanala za nadzor mjernih senzora instaliranih na rotacijske strojeve;
- instalacija sustava direktno na stroju smanjuje investiciju u mjerni sustav;
- standardiziran *interface* za obradu mjernih signala (priključak na Ethernet);
- obrada mjernih veličina i konfiguriranje mjernog sustava putem Omnitrend softvera;
- monitoring mjernih veličina u širokopojasnim ili uskopojasnim frekventnim sektorima;
- maskiranje signala šuma u mjernom signalu;
- nadzirani frekventni pojasi vezani na broj okretaja stroja;
- inteligentna redukcija mjernih signala pri obradi i memoriranju;
- sofisticirano neovisno generiranje alarma;
- kompletna obrada signala unutar Vibnode sustava;

- Vibnode se instalira direktno na stroj i nije mu potreban separatan PC da bi izvršavao svoje mjerne zadatke – povezivanje se vrši na mrežu koja već postoji u kompaniji (Ethernet, Modbus TCP, OCP);
- brza instalacija – set je opremljen robusnim kablovima pripremljenim za instalaciju, kablovi su kratki jer se Vibnode instalira direktno na postolje rotacijskog stroja;
- fleksibilnost mjernog procesa: nadzor stanja moguć je u širokopojasnim frekventnim sektorima ili uskopojasno, na taj način moguće je ostaviti nadzor nad specifičnim karakterističnim frekvencijama koje indiciraju određeni mehanički kvar unutar rotacijskog stroja (u slučaju strojeva s promjenjivim brojem okretaja moguće je konfigurirati frekvencijske pojase koji se nadziru proporcionalne promjeni broja okretaja rotacijskog stroja);
- redukcija podataka u svrhu optimizacije pohrane podataka – pohranjuju se samo FFT spektri ili spektri anvelope signala za ona mjerna mjesta na kojima je pređena zadana granica alarma;
- promptno alarmiranje – relevantno osoblje zaduženo za nadzor procesnog postrojenja alarmira se promptno o nastanku alarma putem Etherneta, eMaila ili SMS-a;
- Vibnode – inteligentni nadzor rotacijskih strojeva (razlog da katkada indicirana pojava kvara na rotacijskom stroju nije registrirana).



Slika 56. Nadzor u širokom frekvencijskom pojasu [10]

Slika 56. prikazuje nadzor ventilatora u širokom frekvencijskom pojasu. Vidljive su karakteristične frekvencije koje su generirane pobudom lopatica ventilatora te komponente vezane na debalans rotora i necentričnost pri kupljanju ventilatora i elektromotora. Frekvencijska komponenta generirana lopaticama ventilatora nadvisuje vrijednosti FFT linija koje ukazuju na debalans i necentričnost. Dominantna vrijednost komponente vezane na lopatice rotorskog kola mjerodvana je pri širokopojasnom mjerenju na ukupnu vrijednost u trending krivulji. Pri porastu npr. debalansa rotorskog kola u trending krivulji to neće biti zamijećeno tj. moguć kvar generiran debalansom neće biti registriran u trending krivulji definiranim alarmnim nivoima.



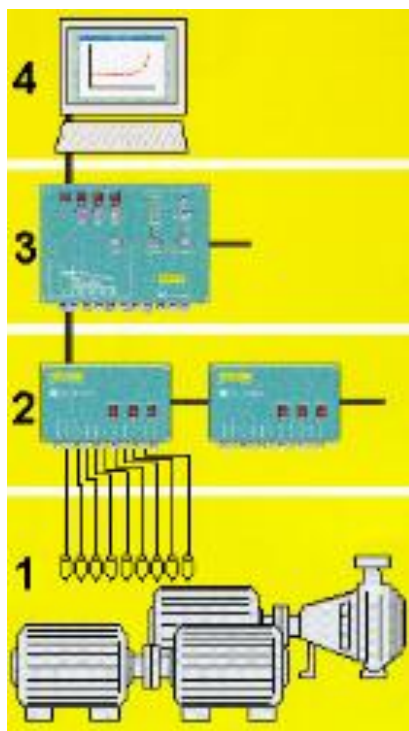
Slika 57. Nadzor u selektivnim frekvencijskim pojasima [10]

Definiranje monitoringa po selektivnim frekvencijskim pojasima eliminirat će maskiranje registracije alarma uvjetovane u ovom slučaju frekvencijskom komponentom generiranom lopaticama rotora ventilatora. Definiranjem dva frekventna selektivna područja omogućuje da porast komponente uvjetovane debalansom bude zamijećena tj. da trending krivulja generira alarm koji indicira kritično stanje i potrebu za intervencijom [Slika 57.]. U jednom spektru moguće je definirati do 12 selektivnih frekvencijskih područja i time maksimalno eliminirati utjecaje neželjenih komponenti koje su neminovno u spektru prisutne (eliminacija šuma u mjerenju).

8.2.3. Vibronet

Vibronet je sustav za stalni nadzor rotacijskih strojeva; mjerni sustav koji omogućuje permanentni uvid u stanje rotacijskih strojeva u kompletnom procesnom parku. Vođen i podržan snažnim *Vibronet trend* softverom omogućuje nadzor nad do 1152 mjernih lokacija u sustavu, stvarajući bazu podataka izmjerenih veličina bitnih za stanje strojeva, radeći trending

stanja i upozoravajući korisnika unaprijed na eventualne kvarove koji su predvidivi kao i na vremenske termine ispada pojedinog stroja. Na taj način osigurava korisniku mogućnost pravovremenog planiranja nabave rezervnih djelova i predviđanja remontnih zahvata koji su neophodni. Sve to uz nisku cijenu, uspoređujući s drugima, daje kao rezultat smanjenje investicija nadzora procesnog sustava uz reducirano vrijeme zastoja proizvodnje, a time direktno i rast profita. Vibronet mjerni sustav može se nabaviti i u varijanti eksplozivne zaštite (S zaštita), a mjerni senzori se mogu permanentno montirati u ulje, vodu i ostalo do 10 metara dubine. [11]



Slika 58. Princip mjerenja i obrade podataka sustavom Vibronet [11]

Princip mjerenja i obrade podataka sustavom Vibronet prikazan je slikom [Slika 58]:

1. Jedinični strojevi u procesnom parku snabdjeveni su različitim osjetilima za nadzor stanja stroja. Ovdje je velika prednost ostvarena time što jedinično osjetilo može mjeriti 3 veličine istovremeno, tj. stanje vibracija, oštećenje ležaja i kavitaciju.
2. Mjerna osjetila se povezuju s MULTIPLESEROM koje može primiti 9 osjetila. Do 16 MUX-a može biti spojeno na jedan MASTER.
3. MASTER - srce VIBRONET mjernog sustava, koji nakon pokretanja sustava samostalno obavlja mjerenje, pohranjuje podatke u memoriju iz koje se podaci unose u PC, kontrolira mjerni proces i međusobnu ispravnost kabliranja, nadzire i daje

alarmne indikacije, omogućuje povezivanje na vanjski INTERFACE za prijenos izmjerenih podataka itd. Do 8 MASTERA može biti spojeno u sustavu.

4. PC koji posjeduje instaliran VIBRONET TREND softver. Softverom se pokreće mjerni sustav, određuju mjerene veličine na pojedinim mjernim mjestima, setiraju alarmni nivoi, stvara baza izmjerenih podataka, radi trending aktuelnog stanja itd.

Vibronet mjernim sustavom, moguće je obuhvatiti mjerenje na do 1152 mjerne lokacije, a na tim mjernim lokacijama moguće je mjeriti [11]:

- oštećenje ležajeva → SPM (Shock Pulse Measurement) - dBn, dBsv, dbc;
- stanje vibracija → akceleraciju, brzinu i pomak - RMS, 0-p, p-p;
- kavitaciju;
- temperaturu;
- broj okretaja - okr/min;
- mjerenje temperaturnog istezanja stroja sustavom PERMALIGN.

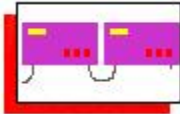

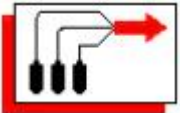
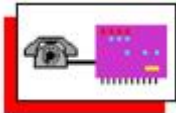


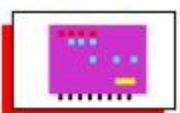


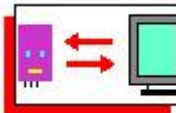


Slika 59. Vibronet sustav u eksploataciji [11]

Na slici 59. je prikazan Vibronet sustav u eksploataciji. U žučkastom krugu izdvojen je *multiplex* na koji je priključena grupa osjetila koji su montirani na odgovarajuće mjerne točke na procesnom stroju. Izlaz prikazanog *multiplex*-a vodi se na jedan od ulaza *master*-a koji je vidljiv na lijevoj strani prikazane slike. Izlaz iz *master*-a odvodi se na PC u koji je instaliran *Vibronet trend* softver.

Sva obilježja Vibronet sustava ukratko nalaze se u tablici ispod [Tablica 2.].

Tablica 2. Karakteristike Vibronet sustava [11]

	Modularni koncept, nadogradiv uz minimalne zahvate.		Jedan multi senzor obavlja tri vrste mjerenja - vibracija, oštećenja ležajeva i kavitacije.
	Niska instalacijska cijena kompletnog sustava na bazi multipleks koncepcije.		Telemonitoring - putem modem veza u konzalting centar (stalan nadzor i savjeti).
	Moguća dužina kablova i do 1000 m uz module za prihvrat multiplexera i osjetila.		Industrijska montaža osjetila bez lemljenja, skidanja izolacije kablova. Osjetila mogu biti u ulju, vodi, i do 10 m dubine.
	Sustav može raditi i samostalno tj. bez podrške PC-a.		Automatski nadzor kompletnog mjernog sustava, kontrola alarmnih nivoa i alarmiranje.
	Vibronet trend softver radi u Windows okruženju.		Auto setup sustava na osnovi auto prepoznavanja hardverske konfiguracije mreže.

Karakteristike Vibronet mjernog sustava [11]:

1. Upravljanje Vibronet trend softverom

Cijeli mjerni sustav se konfigurira Vibronet trend softverom kojim se određuju svi mjerni parametri za sva mjerna mjesta. Softver automatski radi trending na bazi izmjerenih veličina, iscrtava ga u obliku grafa te daje vremenski termin ispada stroja na bazi proračunatog predvidivog budućeg razvijanja stanja. O svim izmjerenim trendovima moguće je ispisati izvještaje koji su u skladu sa ISO 9001 standardom. Nadalje, njime se određuje mjerna konfiguracija u smislu što se na kojem mjernom mjestu mjeri te ciklus mjerenja, rute mjerenja itd. Softverom se također postavljaju alarmni nivoi za pojedine mjerne veličine, određuje vrijeme zadržavanja alarmne indikacije u svrhu poništenja lažnih alarma, nadzire vrijednost izmjerenih podataka u smislu nose li oni novu informaciju u odnosu na prethodno izmjerenu, provjerava ispravnost instaliranja kompletne mjerne mreže itd.

2. Neovisna operabilnost

Jednom konfigurirani mjerni sustav radi samostalno upravljajući master-om preko kojega je također moguć nadzor i mijenjanje mjernih parametara sustava kao npr. uključivanje ili

isključivanje pojedinih mjernih senzora, kontrola svih mjernih senzora, postavljanje, uključivanje ili isključivanje alarmin nivoa itd.

3. *Permanentno uzimanje mjernih podataka*

Neovisno o vanjskom PC-u, master uzima mjerne podatke s mjernih lokacija po programiranoj ruti i pohranjuje ih u svoju memoriju (do 1 000 000 mjernih rezultata može biti pohranjeno u privremenu memoriju prije prebacivanja u PC).

4. *Teletrend mjerni sustav*

Mjerni podaci se mogu slati modemom na udaljeno mjesto gdje se nalazi PC koji ih obrađuje. Modem komunikacija moguća je putem telefonske linije ili radio komunikacijom.

5. *Višestruka kompatibilnost*

Na mjerni sustav moguće je priključiti i ostale mjerne uređaje radi uzimanja izmjerenih podataka (Vibrotip, Vibrospect FFT, data kolektor, spektralni analizator) te radi kontrole ulazno izlaznih podataka (alarmne sirene ili svjetlosni alarmi).

6. *Ekonomski faktor*

Budući da je Vibronet mjerni sustav koncipiran na bazi multiplex mjerenja, nadogradiv je uz minimalne zahvate. Posjeduje jedan senzor koji mjeri tri mjerne veličine, tj. stanje vibracija, stanje oštećenja ležaja te kavitaciju. Cijena sustava po jednom mjernom mjestu može se dosta spustiti u konfiguriranom mjernom sustavu – čak 3 - 4 puta niže od cijene za uobičajen pristup mjerenju.

8.2.4. *Vibrex*

Vibrex predstavlja modularni sustav za permanentno praćenje vibracija i oštećenja ležajeva.

Osnovni principi na kojima je sustav koncipiran su [12]:

- "instaliraj i zaboravi" - "*install and forget*";
- nadogradivost na temelju modularnog koncepta;
- ekonomičnost zbog pristupačne cijene;
- sve mjerno alarmne funkcije sadržane su unutar kućišta modula;
- strujni izlaz 4 - 20 mA po mjernom kanalu;

- relejni izlazi za dva praga alarma uz podesivo vremensko reagiranje;
- mjerni senzori mogu biti permanentno montirani uronjeni u ulje, vodu ili slično do 10 metara dubine;
- konstrukcija za uporabu u industrijskim uvjetima vlage i prašine (IP 65 zaštita);
- izvedba za uporabu u eksplozivnoj atmosferi (S zaštita) također na raspolaganju.

Sustav se sastoji od osnovnog modula uz sposobnost mjerenja dvije mjerne komponente u kombinacijama i to [12]:

- vibracije u skladu sa ISO 2372 (10 Hz do 1000 Hz);
- vibracije za strojeve s niskim brojem okretaja (1 Hz do 1000 Hz);
- vibracije za mjerenje sustava prijenosa, reduktora i getriba (1 Hz do 3000 Hz);
- oštećenje ležajeva na standardnim strojevima;
- oštećenje ležajeva na strojevima s niskim brojem okretaja.



Slika 60. Vibrex mjerni sustav [12]



Slika 61. Vibrex mjerno osjetilo [12]

Na slici 60. i slici 61. prikazani su Vibrex mjerni sustav i mjerno osjetilo. Značajno je što jedno mjerno osjetilo može mjeriti odjednom dvije mjerne veličine, tj. i nivo vibracija i nivo oštećenja ležaja. Ukoliko se želi na jednom mjernom mjestu kontrolirati nivo vibracija i oštećenje ležaja potreban je samo jedan mjerni senzor, dok se u Vibrex mjernom sustavu nalaze moduli za mjerenje vibracija i mjerenje oštećenja ležaja.

Na prikazanoj slici Vibrex uređaja [Slika 60.] lijevi modul je za mjerenje vibracija, dok se desno nalazi modul za mjerenje oštećenja ležajeva. Ulazno izlazni konektorski priključci su na slici obojani i označavaju sljedeće priključke:

1. dovod napajanja 220 V ili 24 VDC,
2. izlaz 4 - 20 mA za lijevi mjerni modul,
3. izlaz 4 - 20 mA za desni mjerni modul,
4. priključni ulaz mjernog senzora za lijevi mjerni modul,
5. izlaz za Alarm 1 i Alarm 2 lijevog mjernog modula,
6. izlaz za Alarm 1 i Alarm 2 desnog mjernog modula,
7. priključni ulaz mjernog senzora za desni mjerni modul.

Za gore navedene mjerne veličine mogu biti konfigurirani različiti mjerni moduli i to jednokanalni ili dvokanalni te uz različite međusobne kombinacije mjerenja vibracija i oštećenja ležajeva. Sustav se modularno proširuje na željeni broj mjernih mjesta, kao i po vrsti mjernih veličina koje je potrebno nadzirati. Moguće je ostvariti 29 različitih mjernih konfiguracija. Sustav je jednostavan za ugradnju i praktički zahtjeva samo prvotno podešavanje, a nakon toga o njemu više nije potrebno brinuti. Nadzor strojeva ostvaren ovim načinom pruža višestruk pristup mjerenju i informacijama koje sustav daje odnosno [12]:

- a) Sustav se može koristiti kao jednostavan zaštitni stupanj, gdje pri porastu nivoa vibracija ili oštećenja ležajeva iznad definiranih za alarmne nivoe dolazi do isklopa strojeva pod nadzorom iz pogona.
- b) Sustav se može koristiti da daje informaciju o potrebi pristupu mjerenju s npr. FFT analizatorom nakon prelaska nivoa vibracija ili oštećenja ležaja preko prvog alarmnog nivoa. Pri tome se FFT analizatorom možemo direktno priključiti na uređaj koji je pridružen željenoj mjernoj lokaciji te izvršiti detekciju mehaničkog kvara na

rotacijskom stroju koji je prouzrokovao povećanje mjerne veličine iznad postavljenog alarmnog nivoa.

- c) Sustav uz gore navedene mogućnosti može biti i konstantno vezan na monitoring preko zapisa s pisačem ili preko nadzora PC-om. Takav mjerni sustav može ostvarivati i sve prednosti *trending monitoring*-a uz kreiranje baze podataka te uz mogućnost generiranja zapisa i dokumentacijskih reporta.

Sve ove opisane metode nadzora su s ciljem ostvarivanja osnovnog koncepta održavanja tj. da se unaprijed planiraju rezervni dijelovi i zahvati na rotacijskim procesnim strojevima, a kako bi se time vrijeme između dvaju zastoja strojeva produžilo što je više moguće te kako bi se sami zahvati na strojevima odvijali u planski određenim terminima koji ne bi uvjetovali prekid proizvodnje.

8.3. Uređaji za balansiranje rotacijskih tijela

8.3.1. *Portable Balancing Set PBS 380*

Portable Balancing Set PBS 380 je uređaj namijenjen za dinamičko i statičko balansiranje rotacijskih tijela metodom "na licu mjesta", tj. bez demontaže stroja kojeg je potrebno balansirati. Namijenjen je također u kontroli kvalitete i sanaciji debalansa finalnih rotacijskih proizvoda ili njegovih rotirajućih dijelova. U ovom slučaju se PBS 380 upotrebljava kao univerzalna elektronika za statički balans stroja. Korekcijske mase se pri tome računaju na dodatnom PC softveru. Ovaj oblik je specijalno primjenjiv za potrebe zahtjevnog i preciznog balansiranja. Pri tome se pojedini tipovi rotora pohranjuju u memoriju PC-a te se pri potrebi balansiranja idućeg tipa takvog rotora odmah pristupa korekturi masa debalansa bez potrebe dodavanja probnih utega.

PBS 380 daje očitavanje faznih kuteva debalansa na LCD-u s rezolucijom 1 stupanj. Eliminirana je također i potreba visokostručnog kadra pri rukovanju s uređajem u procesu korekcije debalansa jer se podaci direktno očitani s LCD-a ubacuju u računalo, čime je uveliko skraćen postupak balansiranja. U postupku balansiranja potrebno je samo jedno probno mjerenje test utegom, a sve daljnje korekcije masa računaju se uz pomoć računala s upisanim softverima za iterativno vođenje operatora pri balansiranju do krajnjeg cilja, tj. postizanja adekvatnog balansiranja.

Uređaj po svojoj kvaliteti balansiranja može obuhvatiti najpreciznija balansiranja zahtjevana međunarodnim standardom ISO 1940. Pored navedenog, uređaj u postupku balansiranja može raditi u manualnom ili *auto tracking* režimu operacije. Pri *auto tracking* režimu uređaj se automatski podesi na frekvenciju vrtnje objekta kojeg balansiramo i sam podesi filter na nultu fazu kako bi omogućio ispisivanje vjerodostojnih podataka na svojim zaslonima. Također, uređaj posjeduje i automatska upozorenja korisniku u slučaju da nije ispravno pripremio uređaj za proces mjerenja. *Auto tracking* ili automatsko podešavanje uređaja obuhvaća brojeve okretaja od 100 okr/min do 60 000 okr/min pri kojima je moguće provoditi balansiranje. Da bi se balansiranje izvršilo što točnije potrebno je omogućiti što bolju filtraciju osnovnog harmonika vibracija uvjetovanog debalansom rotacijskog tijela. U tu svrhu moguće je odabrati postotnu širinu filtera po želji i po potrebi pri balansiranju i to u 5 područja sve do postotne širine od 1,5%, čime je postignuto visoko potiskivanje mogućih parazitnih komponenti vibracija sadržanih u ukupnom spektru, koje bi mogle utjecati na proces balansiranja.

Pored procesa balansiranja u skladu s međunarodnim standardom ISO 1940, uređaj mjeri i vibracije u skladu s međunarodnim standardima ISO 2372, ISO 2373, VDE 2056, BS 4675, odnosno i šire jer operator ima mogućnost proširiti frekvencijsko područje mjerenja i spustiti donju graničnu frekvenciju na 1 Hz. Nivo bilo vršne ili efektivne vrijednosti vibracija očitava se na LCD zaslonu. Uređaj ima također sposobnost frekvencijske analize vibracija i to u spektru od 1 Hz do 1000 Hz pri čemu se centralna frekvencija analize indicira na četveroznamenkastom LCD-u. Analiza je moguća u manualnom ili *auto tracking* režimu operacije. Uređaj nadalje posjeduje mogućnost mjerenja broja okretaja rotacijskog tijela i to u rasponu od 100 okr/min do 60 000 okr/min s rezolucijom od 1 okr/min. [13]

Glavne osobine uređaja [13]:

- Dinamičko i statičko balansiranje rotacijskih tijela bez demontaže procesnog stroja - metoda "na licu mjesta".
- Računalna obrada izmjerenih podataka. Dodatna fina korekcijska balansiranja samo s jednim stavljanjem probnog utega.
- Kontrola kvalitete i sanacija debalansa finalnih rotacijskih proizvoda ili njihovih rotirajućih dijelova uporabom PBS 380 kao univerzalne elektronike za statički balans

stoj. Korektivne mase se u tom slučaju računaju dodatnim softverom na PC-u. Specijalno primjenjivo gdje se zahtjeva visoka kvaliteta balansiranja.

- Digitalno mjerenje broja okretaja.
- Mjerenje i frekvencijska analiza vibracija u svrhu održavanja po stanju rotacijskih strojeva.

Tehničke specifikacije [13]:

- vibracijska osjetila: piezoelektrična;
- usaglašen sa standardima: ISO 1940 na području balansiranja; ISO 2372, ISO 2373, VDE 2056, BS 4675 na području mjerenja vibracija (posjeduje mogućnost proširenja frekvencijskog opsega mjerenja od 1 Hz do 1 000 Hz);
- točnost: 10 % u skladu sa DIN 45666 - stvarna postignuta točnost bolja od 5 % u cijelom frekvencijskom području specificiranom prema DIN 45666;
- donja granična frekvencija: 1 Hz, 10 Hz;
- konverzija: brza, spora;
- mjerne veličine: vibracijsko ubrzanje vršno ili RMS, vibracijska brzina vršno ili RMS, vibracijski pomak vršno ili RMS;
- sonde za referencu faze vibracija ili mjerenje broja okretaja: beskontaktna opto sonda i beskontaktna magnetna sonda;
- nivo okidanja opto sonde: kontinuirano podešiv;
- indikacija okidanja opto sonde: LED diodom;
- indikacija optimalno podešene opto sonde ili magnetne sonde: LED diodom i LCD zaslonom;
- mjerenje broja okretaja: digitalno, beskontaktno, rezolucija 1 okr/min, područje mjerenja 100 okr/min do 60 000 okr/min;
- mjerenje faznog kuta debalansa: digitalno, 1 do 360 stupnjeva, rezolucija 1 stupanj, frekventno područje mjerenja faznog kuta od 1,6 Hz do 1 000 Hz;
- postotna širina analize vibracija: 23 %, 10 %, 6 %, 3 %, 1,5 %;
- režim rada pri frekvencijskoj analizi vibracija: Auto Tracking, Manual, Auto Sweep;
- rezolucija centralne frekvencije analize vibracija: 0,1 Hz ili 1 Hz;

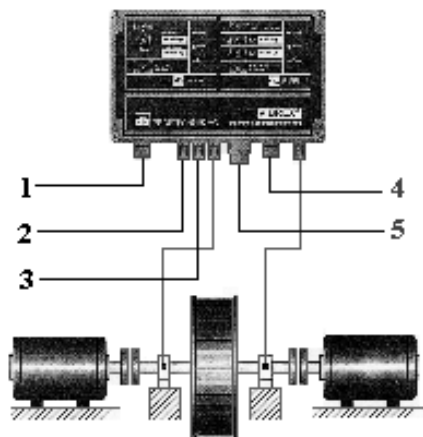
- greška pojačanja filtera: < 1 dB;
- indikacija preopterećenja mjernog lanca: LED diodom, LCD zaslonom;
- vanjski priključci: taho proba, 2 x piezoelektrično osjetilo, osciloskop, External Sweep Input, Manual Control Output, Output Pek - DC, Output RMS – DC;
- napajanje: akumulatorske NiCd baterije ili 220 V;
- indikacija punjenja NiCd baterija: LED diodom;
- indikacija ispražnjenosti NiCd baterija: automatsko na LCD zaslonu.

9. APLIKATIVNA PRIMJENA

9.1. VIBREX - primjeri mjerne aplikacije u praksi

VIB 5.762 I VIBREX - dvokanalni monitoring vibracija, točnije monitoring "efektivne vrijednosti vibracijske brzine" (RMS) u skladu s međunarodnim standardom ISO 2372 na dvije mjerne lokacije - se sastoji od [12]:

- 1 x VIB 5.750 osnovni modul,
- 2 x VIB 5.755 I - modula za mjerenje vibracija,
- 2 x VIB 6.120 - standardni industrijski mjerni akceleratori,
- 2 x kabel (TNC konektor) duljine 3 metra.



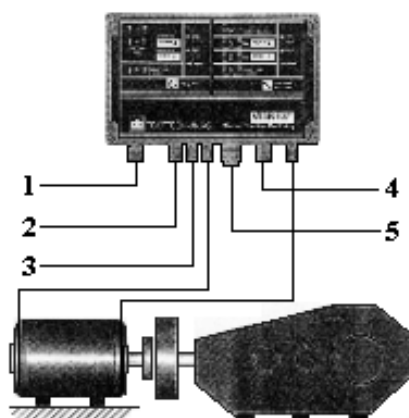
Slika 62. Priključeni VIB 5.762 I Vibrex mjerni sustav [12]

Na slici 62. su nabrojani priključni ulazno izlazni konektori kako slijedi:

1. napajanje Vibrex mjernog modula - 220 VAC ili 24 VDC;
2. izlaz 4 - 20 mA za lijevi mjerni modul;
3. izlaz 4 - 20 mA za desni mjerni modul;
4. izlaz za Alarm 1 i Alarm 2 desnog mjernog modula;
5. izlaz za Alarm 1 i Alarm 2 lijevog mjernog modula.

VIB 5.764 I VIBREX - dvokanalni monitoring oštećenja ležajeva za standardne strojeve, točnije stalni monitoring "oštećenja ležajeva" (metoda udarnih impulsa - *Shock Pulse Technique*) na dvije mjerne lokacije - se sastoji od [12]:

- 1 x VIB 5.750 osnovni modul,
- 2 x VIB 5.756 I - modul za mjerenje oštećenja ležajeva,
- 3 x VIB 6.120 - standardni industrijski mjerni akcelerometar,
- 2 x kabel (TNC konektor) duljine 3 metra.



Slika 63. Priključeni VIB 5.764 I Vibrex mjerni sustav [12]

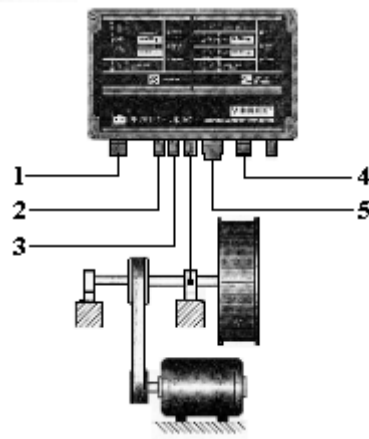
Na slici 63. su nabrojani priključni ulazno izlazni konektori kako slijedi:

1. napajanje vibrex mjernog modula - 220VAC ili 24 VDC;
2. izlaz 4 - 20 mA za lijevi mjerni modul;
3. izlaz 4 - 20 mA za desni mjerni modul;
4. izlaz za Alarm 1 i Alarm 2 desnog mjernog modula;
5. izlaz za Alarm 1 i Alarm 2 lijevog mjernog modula.

VIB 5.765 I VIBREX - jednokanalni sustav za mjerenje oštećenja ležaja i vibracija za standardne tipove strojeva, točnije stalni monitoring "oštećenja ležaja" (metoda udarnih impulsa - *Shock Pulse Technique*) i "vibracijske efektivne brzine" (RMS) u skladu s ISO 2372 - se sastoji od [12]:

- 1 x VIB 5.750 osnovni modul,
- 1 x VIB 5.755 I - modul za mjerenje vibracija,

- 1 x VIB 5.756 I - modul za mjerenje oštećenja ležaja,
- 1 x VIB 6.120 standardni industrijski mjerni akcelerometar,
- 1 x kabel (TNC konektor) duljine 3 metra.



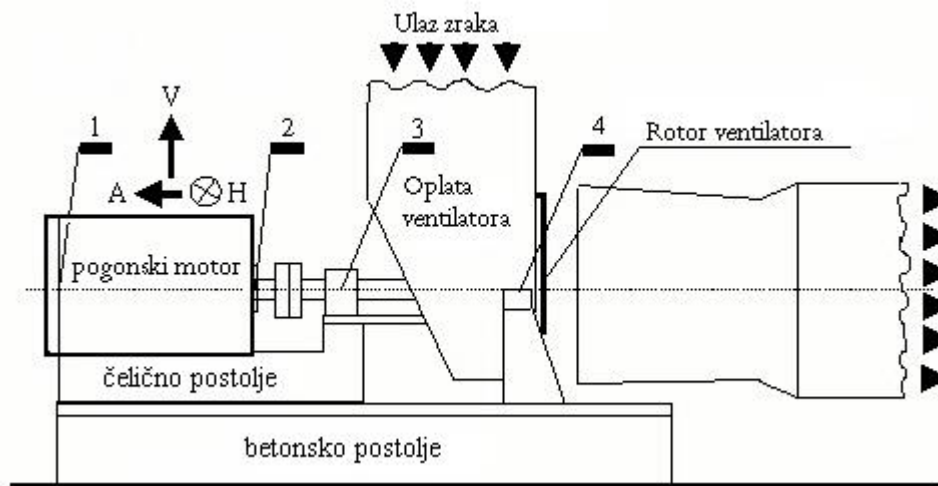
Slika 64. Priključeni VIB 5.765 I Vibrex mjerni sustav [12]

Na slici 64. su nabrojani priključni ulazno izlazni konektori kako slijedi:

1. napajanje Vibrex mjernog modula - 220VAC ili 24 VDC;
2. izlaz 4 - 20 mA za lijevi mjerni modul;
3. izlaz 4 - 20 mA za desni mjerni modul;
4. izlaz za Alarm 1 i Alarm 2 desnog mjernog modula;
5. izlaz za Alarm 1 i Alarm 2 lijevog mjernog modula.

9.2. PORTABLE BALANCING SET PBS 380 - primjeri mjerne aplikacije u praksi

Efikasnost uređaja Portable Balancing Set PBS 380 te postupak balansiranja metodom "na licu mjesta" bit će prikazan na primjeru balansiranja rotora koji nema svojstva potpuno krutog rotora. [13]



Slika 65. Balansiranje s BPS 380 - metoda "na licu mjesta" [13]

Na slici 65. nalazi se prikaz ventilatora svježeg zraka u termoelektrani na kojem su bile uočene povišene vibracije. Dakle, na ventilatoru je bilo potrebno detektirati i otkloniti povišene vibracije kako bi se nastavio nesmetan rad energetske jedinice u eksploataciji. Mjerenje je izvršeno na setu motor ventilator i utvrđeno je da su vibracije na strani motora niske, dok su na strani ventilatora na mjernim mjestima 3 i 4 bile značajno povišene. Frekventnom analizom je utvrđeno da je u spektru vibracija dominantan harmonik koji odgovara brzini rotacije ventilatora. Ostale komponente vibracija su bile niske.

Zatim se pristupilo detaljnijim mjerenjima na lokacijama 3 i 4 u svrhu definitivne odluke o prisutnom debalansu. Vibracijske veličine su izmjerene u horizontalnom i vertikalnom smjeru na ležajevima 3 i 4 uz mjerenje faznog kuta. Na lokaciji 3 direktan pristup ležaju je bio moguć, dok je na mjernom mjestu 4 signal vibracija bio prigušen zbog nemogućnosti direktnog pristupa ležajnom bloku. Kako je fazna razlika vibracijskog signala na lokacijama 3 i 4 za horizontalni i vertikalni smjer mjerenja bila ista (uz dozvoljena odstupanja ± 30 stupnjeva) te kako je pri mjerenju bio dominantan prvi harmonik vibracija, to je nedvojbeno ukazivalo da je uzrok povišenih vibracija debalans rotora ventilatora. Preporučeno rješenje je da se pri prvom zaustavljanju proizvodnje balansira rotor ventilatora.

Oplata ventilatora je pomaknuta tako da bi bio moguć pristup rotoru ventilatora u svrhu dodavanja korekcijskih masa. Kao podaci za proračun uzeti su oni s lokacije 3 (horizontalan smjer) zbog boljeg odziva na pobudu uvjetovanu centrifuganom silom rotacije debalansa. U mjernom postupku primijenjena je *auto tracking* funkcija uređaja PBS 380 koja omogućuje

automatsko podešavanje parametara filtera za izdvajanje osnovnog harmonika, tako da se potrebni podaci na LCD zaslonima dobivaju u trenutku nakon postizanja broja okretaja rotora ventilatora. Pri balansiranju upotrebljena je test masa utega od 50 grama na radijusu balansiranja na rotoru ventilatora.

Tablica 3. Izmjereni podaci za početno stanje [13]

Početno stanje	Lokacija 3		Lokacija 4	
	Amplituda RMS (mm/s)	Faza (stupnjeva)	Amplituda RMS (mm/s)	Faza (stupnjeva)
Horizontalno	13,7	345	3,3	15
Vertikalno	3,9	60	1,7	85

Tablica 4. Izmjereni podaci uz test masu [13]

Test masa 50 g	Lokacija 3		Lokacija 4	
	Amplituda (mm/s)	Faza (stupnjeva)	Amplituda (mm/s)	Faza (stupnjeva)
Horizontalno	6,7	338	1,9	4

Podaci izmjereni za početno stanje [Tablica 3.] - lokacija 3 i podaci izmjereni uz test masu od 50 grama [Tablica 4.] uzeti su kao ulazni podaci pri računanju korekcijskih masa. Kao rezultat dobiveno je da je potrebno staviti uteg od 96 grama na kut od 353 stupnja. Odstranjuje se probni uteg i odabire 45 grama te postavlja aproksimativno na kut od 353 stupnjeva računajući od kuta nula u smjeru rotacije rotora (nula stupnjeva je pri tome pozicija gdje je bila test masa). Nakon što je stavljena korekcijska masa u svrhu provjere pristupa se prvoj provjeri stanja izbalansiranosti.

Tablica 5. Prva provjera stanja izbalansiranosti [13]

Prva provjera	Lokacija 3	
	Amplituda RMS (mm/s)	Faza (stupnjeva)
Horizontalni smjer	6,1	359

Dobiveni rezultati prve provjere se sada direktno upisuju u program računala te on proračunom daje korekcijsku masu za dodatno poboljšanje stanja debalansa od 42 grama koju treba postaviti na kut od 7 stupnjeva. Odabire se masa od 35 grama i postavlja na aproksimativni kut od 7 stupnjeva. Nakon što je druga korekcijska masa stavljena na rotor pristupa se drugoj provjeri stanja izbalansiranosti.

Tablica 6. Druga provjera stanja izbalansiranosti [13]

Druga provjera	Lokacija 3	
	Amplituda RMS (mm/s)	Faza (stupnjeva)
Horizontalni smjer	0,9	132

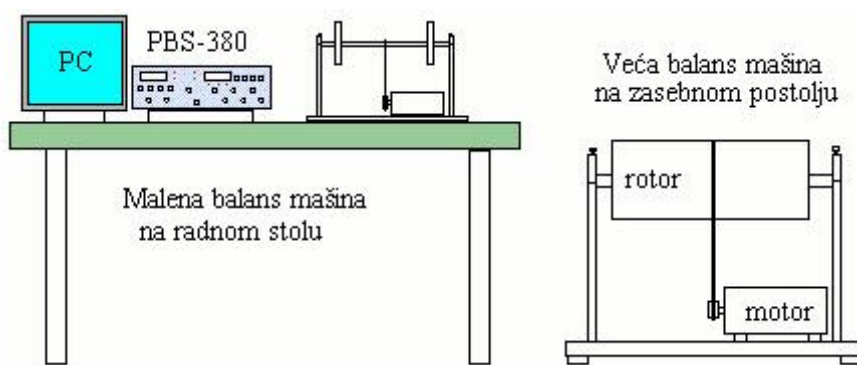
Dobiveni rezultati druge provjere se sada opet direktno upisuju u program računala te on proračunom daje masu za još finije balansiranje, tj. 6,3 grama na kutu od 140 stupnjeva. Odabire se 5 grama i postavlja na aproksimativni kut od 140 stupnjeva. Nakon što je masa stavljena na rotor pristupa se trećoj provjeri stanja izbalansiranosti.

Tablica 7. Treća provjera stanja izbalansiranosti [13]

Treća provjera	Lokacija 3	
	Amplituda RMS (mm/s)	Faza (stupnjeva)
Horizontalni smjer	0,08	310

Na kraju se za preostalu komponentu vibracije uvjetovane debalansom dobiva vrijednost od 0,08 mm/sek RMS. Ova vrijednost vibracija je duboko u dobrom području rada prema standardu ISO 2372, VDE 2056. [13]

U sljedećem, drugom primjeru prikazano je balansiranje gdje se uređaj Portable Balancing Set PBS 380 primjenjuje kao univerzalna elektronika na statičkom stroju za balansiranje [13].

**Slika 66. Balansiranje s BPS 380 – statička balansirka [13]**

U ovom primjeru primjene uređaja Portable Balancing Set PBS 380 daje se prikaz njegove uporabe kao univerzalne elektronike za balansiranje rotirajućih dijelova - ovdje rotirajućeg segmenta prema slici 66. Mehanika statičkog stroja za balansiranje nije zahtjevana i korisnik je može izraditi uz minimalne troškove. Potrebno je dio koji se balansira zavrtiti te s potporna mjesta rotacijskog dijela uzeti signale koji se u uređaju PBS 380 obrađuju u svrhu proračuna masa korekcije.

Prikazan je postupak balansiranja u dvije ravnine gdje je za balansiranje bitno istaknuti sljedeće [13]:

- Mehanika koja je potrebna da bi se tijelo koje se balansira zavrtilo nije zahtjevana, a što omogućuje kvaliteta elektronike uređaja PBS 380. Time je korisniku omogućena ušteda zbog jednostavnosti mehanike koju može sam izraditi. Masa tijela koje se balansira nije ograničena.
- Brzina vrtnje tijela koje se balansira može biti od 100 okr/min do 60 000 okr/min.
- Balansiranje se može provoditi za jedan komad ili za seriju komada. Ukoliko se balansira serija tada se tip rotora kojeg se balansira poziva iz memorije PC-a i odmah pristupa balansiranju. Ukoliko se balansira samo jedan jedinstveni komad tada je potrebno postaviti probne utege u ravnine korekcije. Ukoliko se pak balansira u jednoj ravnini tada je potrebno postavljati jedan probni uteg, dok je za balansiranje u dvije ravnine potrebno postavljati dva probna utega - ali samo za prvi komad iz serije ili samo za jedinstveni komad koji se pojavljuje samo jednom u balansiranju.

Postupak balansiranja u dvije ravnine prema rotirajućem dijelu na slici 66. [13]:

1. korak - rotirajući komad zavrtiti i izmjeriti početna stanja debalansa;
2. korak - u odabranu prvu ravninu korekcije postaviti probni uteg (ovdje 0,54 grama) te izmjeriti utjecaj utega;
3. korak - u odabranu drugu ravninu korekcije postaviti probni uteg (ovdje 0,54 grama) te izmjeriti utjecaj utega.

U mjernom postupku primijenjena je *auto tracking* funkcija uređaja PBS 380 koja omogućuje automatsko podešavanje parametara filtera za izdvajanje osnovnog harmonika,

tako da se potrebni podaci na LCD zaslonima dobivaju u trenutku nakon postizanja broja okretaja rotora ventilatora.

Tablica 8. Balansiranje u dvije ravnine [13]

	1. ravnina (stanje debalansa)	Fazni kut (stupnjevi)	2. ravnina (stanje debalansa)	Fazni kut (stupnjevi)
1. korak	2,6	27	2,3	160
2. korak	4,3	73	1,8	145
3. korak	3,0	30	4,8	121

Test masa iznosi 0,54 grama za prvu i drugu ravninu. Radijus na kojem se stavlja te zatim korigira test masa je 42 mm. Izmjereni podaci upisuju se u PC koji računa korekcijske vrijednosti. Upisani podaci se mogu pohraniti kao file pod imenom rotora te kasnije pozivati kada god postoji takav rotor ponovo za balansiranje. U tom slučaju nije više potrebno postavljati probne utege već se odmah prelazi pri prvom mjerenju na računanje korekcijskih vrijednosti.

Tablica 9. Podaci za korekciju 1 [13]

Podaci za korekciju	Masa (gram)	Kut dodavanja (stupnjevi)	Kut oduzimanja (stupnjevi)
Ravnina 1	0,44	90	270
Ravnina 2	0,43	235	55

Postupak korekcije [13]:

- ravnina 1: od mjesta oznake za referencu foto sonde u smjeru rotacije za 270 stupnjeva brusnim alatom skinuti 0,44 grama;
- ravnina 2: od mjesta oznake za referencu foto sonde u smjeru rotacije za 55 stupnjeva brusnim alatom skinuti 0,43 grama;

Odabrana je korekcija oduzimanjem mase. Ukoliko se želi korekciju vršiti dodavanjem mase potrebno je upotrijebiti vrijednosti za "kut dodavanja".

Nakon izvršenog oduzimanja mase komad se zavrti radi provjere te se dobiju podaci iz tablice 10.

Tablica 10. Korekcija – provjera 1 [13]

Provjera 1	1. ravnina (stanje debalansa)	Fazni kut (stupnjevi)	2. ravnina (stanje debalansa)	Fazni kut (stupnjevi)
	0,3	213	0,2	329

Za komad koji se balansira sada treba aktivirati komandnu tipku "serija" na PC-u te unijeti podatke iz gornje tablice. Odmah nakon toga se dobiju novi korekcijski podaci [Tablica 11.].

Tablica 11. Podaci za korekciju 2 [13]

Podaci za korekciju	Masa (gram)	Kut dodavanja (stupnjevi)	Kut oduzimanja (stupnjevi)
Ravnina 1	0,0495	-83	97
Ravnina 2	0,419	46	226

U svrhu finijeg balansiranja ponovo se vrši korektivno oduzimanje (dodavanje) mase, komad se zavrti radi provjere te se dobiju podaci iz tablice 12.

Tablica 12. Korekcija – provjera 2 [13]

Provjera 2	1. ravnina (stanje debalansa)	Fazni kut (stupnjevi)	2. ravnina (stanje debalansa)	Fazni kut (stupnjevi)
	0,1	178	0,1	300

Ovime je balansiranje završeno. Kvaliteta balansiranja je duboko u klasi $G = 0,4$ prema ISO 1940.

Ukoliko je potrebna informacija o ostatnom debalansu tijela za jednu i drugu ravninu tada se ponovo aktivira tipka "serija" na PC-u i unose zadnji dobiveni podaci. Novi podaci koji se dobiju nalaze se u tablici 13.

Tablica 13. Podaci za korekciju 3 [13]

Podaci za korekciju	Masa (gram)	Kut dodavanja (stupnjevi)	Kut oduzimanja (stupnjevi)
Ravnina 1	0,0165	240	60
Ravnina 2	0,019	18	198

Na kraju se za ostatni debalans u ravnini 1 dobiva: $U1 = 0,0165 \text{ g} \times 42 \text{ mm} = 0,69 \text{ gmm}$; a za ostatni debalans u ravnini 2: $U2 = 0,019 \text{ g} \times 42 \text{ mm} = 0,49 \text{ gmm}$.

10. ZAKLJUČAK

Implementacijom preventivnih metoda održavanja ne izmišlja se nešto novo, uzimaju se postojeći elementi nekog sustava i koriste na drugačiji, efektivniji način. Ukoliko želimo povećati pouzdanost i osigurati potpunu dostupnost sustava potrebno ga je redizajnirati tako što će se potreba za korektivnim održavanjem minimizirati. Potrebno je iskoristiti sve mogućnosti koje su nam pružene modernom tehnologijom i iskoristiti znanje koje imamo na raspolaganju kako bi se održavanje provelo na što učinkovitiji način. Održavanje analizom vibracija je samo jedna od mnogih metoda kojima je moguće povećati pouzdanost postrojenja. Cilj ovog rada je bio utvrditi kako analiza vibracija utječe na sustav održavanja postrojenja, kakva je mogućnost implementacije takvog jednog sustava i da li je isplativ. Vibracijska analiza kao preventivna metoda za održavanje opreme kao i svaka druga metoda ima svoje prednosti i svoje mane. Velika prednost, u usporedbi s drugim metodama je jednostavno implementiranje u sustav i prihvatljiva cijena koja razvojem tehnologije sve više opada. Nedostatak je potrebno iskustvo operatera, a problem na koji nailazimo je nerado podnošenje znanja iskusnijih operatera na one sa manje iskustva znajući pri tome da će čim predaju stečena znanja biti zamjenjeni. Porastom sofisticiranosti sustava raste i razina znanja i vještina potrebnih da bi se njime upravljalo te potreba za iskustvom pri dijagnostici na višim razinama. Jednostavni, na softverima bazirani, sustavi koji koriste samo širokopojasna mjerenja mogu biti relativno učinkoviti bez velike razine vještina, ali je od esencijalne važnosti osposobljavanje i dobro razumijevanje tehnologije. Osiguravanje i zadržavanje osoblja s adekvatnim vještinama jedan je od glavnih problema pri praćenju stanja vibracija u sklopu tvrtke, no to se donekle uravnoteži nekim drugim benefitima.

Mjerenje i analiza od izrazite je važnosti kao bitan dio svake tehničke djelatnosti. Kada imamo uravnoteženu strukturu mjerenjem možemo utvrditi da se generiraju samo male vibracije. No starenjem stroja temelj splasne, komponente degradiraju time se promjene i dinamička svojstva stroja. Mjerenjem možemo otkriti asimetričnost koja je nastala, odnosno spriječiti daljnju degradaciju opreme. Postoji bezbroj razloga kvarova strojeva. Neki nastaju zbog osobito agresivnih radnih sredina ili uvjeta rada. Međutim, većina se kvarova može pripisati ili ograničenjima konstrukcije stroja ili nepravilnom montažom, ugrađivanjem ili asimetričnosti. Upravo iz tog razloga nužna je konstantna kontrola praćenja stanja te stoga prednosti analize vibracija dolaze do punog izražaja. [22 – 30]

LITERATURA

- [1] *U.S. Department of Energy*: <http://energy.gov/>
- [2] Bilješke s predavanja (Održavanje 2012., Dragutin Lisjak)
- [3] *Ruhrpumpen*: <http://www.ruhrpumpen.com/Synergetic%20Retrofit/>
- [4] Ivo Čala, predavanja iz održavanja
- [5] *Prüftechnik*: <http://www.pruftechnik.com/de/gruppe-start.html>
- [6] *Eltra*: <http://www.eltra.hr/VibxperII.htm>
- [7] *Eltra*: <http://www.eltra.hr/Vibscanner.htm>
- [8] *Eltra*: <http://www.eltra.hr/Vibrotip.htm>
- [9] *Eltra*: <http://www.eltra.hr/Vibroweb.htm>
- [10] *Eltra*: <http://www.eltra.hr/Vibnode.htm>
- [11] *Eltra*: <http://www.eltra.hr/Vibronet.htm>
- [12] *Eltra*: <http://www.eltra.hr/Vibrex.htm>
- [13] *Eltra*: http://www.eltra.hr/PBS_hr.htm
- [14] *Eltra*: <http://www.eltra.hr/page13.htm>
- [15] The Lifetime Reliability Solutions, Session 5, Language of Vibration Measurement and Analysis
- [16] *Volvo trucks*: <http://www.volvotrucks.com/>
- [17] The Lifetime Reliability Solutions, Session 6, Vibration Measurement Applied To Condition Monitoring
- [18] The Lifetime Reliability Solutions, Session 7, Vibration Analysis for Fault Diagnosis
- [19] The Lifetime Reliability Solutions, Session 8, Vibration Isolation – Theory and Practice
- [20] <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/inertia+block>
- [21] *Citec*:
http://www.citec.com/WebRoot/478924/Engineering_ContentPage.aspx?id=1232208
- [22] Halep, Amir: Održavanje, 2012.
- [23] *Lufthansa Technik*: <http://www.lufthansa-technik.com/de/aircraft-maintenance>
- [24] *Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement*:
<http://www.bksv.com/Products/analysis-software/vibration/structural-dynamics/operational-modal-analysis/operational-modal-analysis-7760.aspx>

- [25] *Veleučilište u Rijeci*:
http://www.veleri.hr/files/datoteke/nastavni_materijali/k_sigurnost_3/ERG%20SIG%20pred%2016%20Buka.pdf
- [26] *Erbessd Instruments*: <http://www.erbessd-instruments.com/eng/dv300.aspx?gclid=CPGOk4PBgrgCFa7JtAodrUAA1A>
- [27] Mayers, Adam: Vibration acceptance criteria, Australian Bulk Handling Review: March/April 2009
- [28] *Informatika*: <http://www.informatika.buzdo.com/s030.htm>
- [29] R. Keith Mobley: An introduction to predictive maintenance, Elsevier Science (USA), 2002.
- [30] Michael W. Kehoe; Lawrence C. Freudinger: Aircraft Ground Vibration Testing at the NASA Dryden Flight Research Facility – 1993, National Aeronautics and Space Administration, June 1994

PRILOZI

- I. Dijagram učinkovitosti izolacije
- II. Četiri glavna razloga nastanka kvara

PRILOG 1. Dijagram učinkovitosti izolacije

Static Deflection Guide ►

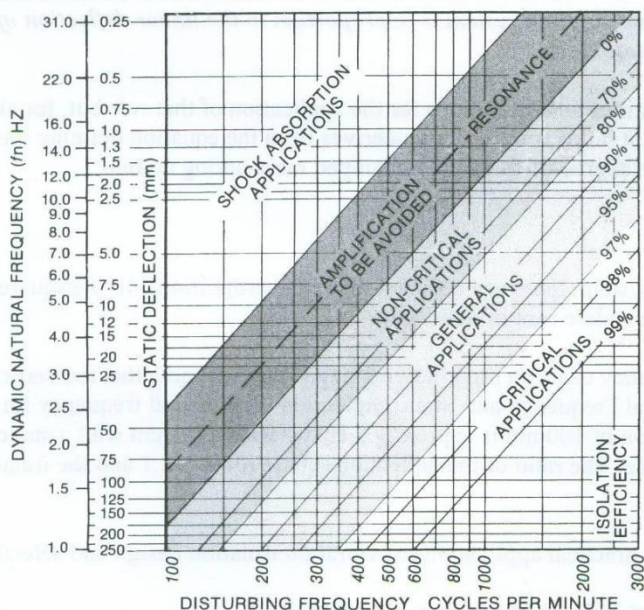
The table provides a guide to the isolator type and necessary static deflection for given values of operating speed and isolation efficiency. It also suggests appropriate levels of isolation efficiency for various operating locations.

To use the table, read the minimum static deflection directly against machine disturbing frequency (operating speed) and required isolation efficiency.

Two static deflection figures appear, one for basement or on-grade installations; the other for upper level installations where some allowance is made for flexibility of the supporting structure. Select the appropriate figure.

For rubber and pad mounts, static deflections have been corrected for average rubber hardness to approximate selections based on dynamic natural frequency (see Isolation Efficiency Chart below).

	DISTURBING FREQUENCY		ISOLATION EFFICIENCY 80%		ISOLATION EFFICIENCY 89%		ISOLATION EFFICIENCY 95%		ISOLATION EFFICIENCY 98%	
			Ground Floor	Upper Floor	Ground Floor	Upper Floor	Ground Floor	Upper Floor	Ground Floor	Upper Floor
	RPM	HZ	ISOLATOR STATIC DEFLECTION (mm)							
High Deflection Springs	200	3.3	125	—	—	—	—	—	—	—
	300	5.0	60	90	110	150	—	—	—	—
25mm Deflection Springs	500	8.3	20	35	40	50	70	90	—	—
	700	11.7	11	18	20	27	40	50	100	120
Rubber Mountings	1000	16.7	6	10	10	15	18	25	50	60
	1500	25.0	3	5	5	8	8	11	20	25
Pad Mountings	2000	33.3	2	4	4	6	6	8	11	15
	3000	50.0	0.8	1.5	1.5	3	4	5	7	10
			NON-CRITICAL AREAS		GENERAL AREAS		CRITICAL AREAS			
			Factories Workshops Garages Warehouses Laundries Basements		Schools Dept. Stores Supermarkets Telephone Exchanges Hotels		Multi-storey Bldgs Offices Hospitals — Service Areas Churches Schools Restaurants		Multi-storey Bldgs Hospitals — Ward Areas Broadcasting Studios Theatres Auditoriums Libraries	



Isolation Efficiency Chart

This chart illustrates the theoretical relationship between isolation efficiency, disturbing frequency and static deflection (or dynamic natural frequency) for a simple isolation system on a rigid foundation. It is also grouped into zones suggesting isolation efficiency ranges appropriate to different applications.

To use the chart, determine the lowest rotation speed of the equipment and consider this to be the disturbing frequency. Move vertically to intersect the diagonal line corresponding to the percentage isolation required; then move horizontally left and read the dynamic natural frequency or static deflection required of the mounting.

It is sufficient to use static deflection to select the correct isolator for spring mounted systems; but for rubber and pad mounts, selection should be made on the basis of dynamic natural frequency.

USING VIBRATION MOUNTINGS

Some simple guidelines for successful vibration control:

- (1) Mounting support points and load ratings should be selected so that the static deflections of all mountings are as uniform as possible.
- (2) Unrestricted movement of resiliently mounted equipment is essential for effective isolation.
 - * Ensure that adequate clearance is maintained around the installed equipment, particularly underneath it, to permit free movement — especially where high deflection mountings are used.
 - * All connections to resiliently supported equipment should themselves be flexible (see Piping Support). As well as restricting equipment motion, any fixed connection can offer a direct path for transmission of vibration to the surrounding structure, bypassing the isolation system.
- (3) Top heavy machinery, especially when mounted on a narrow base, can become unstable if mountings are located too close to each other beneath the equipment. Such instability can be avoided by use of outrigger brackets which space the mountings further apart and

- (4) A rigid base is essential for resiliently supported equipment to avoid misalignment of drive components. Any flexibility in the machine base should be eliminated by the addition of steel stiffeners or use of a concrete inertia base.
 - (5) Piping, ductwork and ancillary equipment connections should not impose dead loads on the resiliently mounted equipment. Their weight should be separately supported.
- Individual data sheets are available for each type of isolator, which provide further details on correct installation and operation.

TECHNICAL ASSISTANCE

All offices of G. P. Embelton and Co. Pty. Ltd. can provide detailed technical assistance on the use of this equipment in specific applications. Facilities are available to develop new or modified systems to resolve unusual or difficult vibration isolation problems.

CONDITIONS OF SALE

All products are sold subject to the published General

PRILOG 2. Četiri glavna razloga nastanka kvara

<i>Greška</i>	<i>Opis greške</i>	<i>VA identifikatori</i>	<i>Vjerojatni uzrok</i>	<i>Moguća rješenja</i>
Neravnoteža	Centar mase rotora je pomaknut od centra rotacije. Rezultat je radijalna sila proporcionalna magnitudi ekscentričnosti i kvadratu brzine osovine/vratila.	Dominantno vrtilo/osovina x1 radialno. Faza pri x1 konstantno njišuća. Horizontalni i vertikalni pomak je uglavnom jednak, a amplituda stabilna. Aksijalna vibracija uglavnom niska.	1. Novi ili demontirani rotor nije pravilno balansiran. 2. Trošenje, korozija ili gomilanje krutih materijala unutar rotora. 3. Neravna osovina/vrtilo. 4. Stroj radi pri frekvenciji blizu vlastite frekvencije strukture ili osovine/vratila.	1. In-situ balansiranje ili uklanjanje provedenog balansiranja. 2. Čišćenje i demontaža motora. 3. Ispravljanje ili zamjena vratila/osovine. 4. Provođenje impulsnih testova ili uzimanje podataka o amplitudi/fazi pri zaustavljanju.
Asimetričnost	Usklađenom i precizno napravljenom sklopu spojki prijenos momenta s jednog vratila na drugo događa se bez razvoja radijalne ili aksijalne sile. To se u praksi nikada ne ostvaruje i stupanj pri kojem nastaju aksijalne i radijalne sile vibracija je mjera pogrešaka strojne obrade ili poravnanja.	Identifikatori variraju: Vibracija je usmjeravajuća i mjerenje faze bi moglo biti od koristi. Paralelna asimetričnost vratila/osovine x2 faza pri x1 ili x2 je pomaknuta za 180° radijalno preko cijele spojke. Kutna asimetričnost vratila/osovine x1, x3, x5. Aksijalna vibracija obično je viša nego radijalna. Vibracija sličnog oblika spektra se uglavnom primjećuje na oba stroja.	1. Loš proces poravnavanja ili netočne tolerancije. 2. Loše postolje ili stanje i konstrukcija držača. Mogućnost prisutnosti <i>Soft-Foot</i> uvjeta. 3. Nedovoljna zračnost za temperaturno širenje. Napomena: loše stanje ili uklapanje spojki na vratilima često stvaraju simptome slične onima kod asimetričnosti.	1. Poravnavanje do tolerancije s novim predlošcima i čistom podlogom. 2. Provjera vibracija u točkama spajanja kako bi se otkrila zračnost ili slabosti općenito. 3. Provjera asimetričnosti odmah nakon gašenja. Ponoviti kada se stroj ohladi i zabilježiti razlike.
Zračnost	Zračnost se promatra kao nelinearni odgovor na apsorpciju sila u stroju. Može biti <i>gravitacijska</i> (npr. slomljena noga motora) ili <i>rotacijska</i> (npr. labavost kućišta u ležaju).	<i>Gravitacijska</i> zračnost – vrtilo/osovina x2 dominantno. <i>Rotacijska</i> zračnost – vrtilo x2, x4. Zračnost spoja – vrtilo x3, x5, x7. Vremenska domena skraćena ili pomaknuta. Prisutnost sub-harmonika. Faza će varirati između početaka.	1. Montažni elementi su labavi ili slomljeni. 2. Zračnost između vratila i ležaja ili zračnost kućišta ležaja. 3. Labavost spojke može proizvesti trapezni val, stoga postoje neparni redovi.	1. Provjeriti i zategnuti. Koristiti mjerenje vibracija dok stroj radi kako bi se pronašla labavost. 2. Napraviti test podizanja, ako je moguće. Demontirati i pregledati. 3. Potražiti izrezbarene prolaze i druge znakove 'rada'. U slučaju nesigurnosti ponovno sklopiti kako bi se osigurala zategnutost.
Greške kotrljajućih elemenata ležaja	Stanjenje ili udubljenje prilikom prolaza kotrljajućeg elementa preko oštećenja otkriva se niskim amplitudnim impulsima ležaja (ting-ting). Habanje kaveza, putanja kotrljajućih elemenata razultira zračnošću ponekad bez vidljivog impulsa ili visoke vibracijske frekvencije.	Najbolji identifikator stvaranja rupica i sličnih stanja su visokofrekventni sustavi otkrivanja kvara ležaja. Trošenje ležaja je teže dijagnosticirati i u početku se može pojaviti u obliku harmonika broja okretaja vratila. Provoditi mjerenja brzine u svrhu pronalaska zračnosti.	1. Udubljenja mogu biti uzrokovana zamorom, lošom montažom. 2. Prodiranje abrazivnog materijala ili agresivnih tekućina u ležaj. 3. Pregrijavanje ležaja. 4. Preopterećenje ležaja. Aksijalno preopterećenje je vrlo čest razlog kvara.	1. Zamijeniti ležaj. Provesti analizu uzroka problema na uklonjenom ležaju. 2. Ispitati / nadograditi brtve. 3. Greške pri instalaciji ili podmazivanju. 4. Prostudirati način kojim je došlo do kvara i reprojektirati sustav ležaja.

